

Indice

Introduzione	3
1 - CFD-Fluidodinamica Computazionale	5
1.1 - CFD: di cosa si tratta?	5
1.2 - Le equazioni della fluidodinamica	6
1.3 - La simulazione numerica	8
1.4 - Le applicazioni della CFD	16
1.5 - HVAC: un'applicazione dell'analisi CFD	18
1.6 - I casi studio in letteratura	18
2 - Il Teatro Carlo Felice	27
2.1 - La storia del teatro	27
2.2 - Impianto di climatizzazione: la distribuzione dell'aria	40
3 - La realizzazione del modello numerico	52
3.1 - I criteri per l'impostazione del problema	52
3.2 - Analisi bidimensionali e tridimensionali	53
3.2.1 - Caso 1	55
3.2.2 - Caso 2	64
3.2.3 - Caso 3	68
3.2.4 - Caso 4	71
3.2.5 - Caso 5	74
3.2.6 - Caso 6	76
3.3 - Il modello 3D	81
4 - Risultati	86
4.1 - Caso 1	87
4.2 - Caso 2	99
4.3 - Caso 3	103
4.4 - Caso 4	107
4.5 - Caso 5	111

4.6 - Caso 6	115
4.7 - Caso 7	119
4.8 - Modello 3D	123
Conclusioni	147
Bibliografia e Sitografia	149

Introduzione

Nella progettazione di nuovi edifici così come nella ristrutturazione e rifunzionalizzazione dell'esistente è sempre più insistente la richiesta di ambienti che offrano alti livelli di comfort interno e, che al tempo stesso siano sempre meno impattanti dal punto di vista ambientale.

All'interno infatti si richiede che ci sia un buon equilibrio termoigrometrico, garantito dalla regolazione dei sistemi di condizionamento, ma anche che siano rispettati i ricambi d'aria minimi, tali da offrire sempre una buona qualità dell'aria.

Tuttavia la sempre più crescente emergenza del cambiamento climatico impone di non ottenere tutto ciò a discapito dell'ambiente e cioè con impianti troppo energivori o inquinanti: si deve dunque mantenere come altrettanto fondamentali prerogative la riduzione dei consumi e delle emissioni, e quindi il contenimento delle dispersioni.

Tutto ciò deve dunque poter essere contemplato, analizzato e valutato in fase di progettazione.

Di questo, e di molto altro ancora, si occupa la fluidodinamica computazionale.

Se infatti, fino a qualche decennio fa non sarebbe stato possibile affrontare analiticamente e, talvolta sperimentalmente, questi problemi, oggi con l'approccio del calcolo numerico è possibile ottenere simulazioni relative a questi fenomeni, nell'arco di qualche giorno, o, addirittura, di qualche ora, per comprendere già in fase di progettazione quali siano le migliori scelte da adottare e quali potranno essere i problemi, una volta realizzato l'intervento.

Con i software CFD infatti si rende possibile la visualizzazione dei flussi dell'aria, ma anche delle sue caratteristiche di velocità, pressione, temperatura, così da poter conoscere le cause di eventuali situazioni di discomfort, ma anche le concentrazioni di inquinanti che potrebbero rendere gli ambienti meno salubri.

Questo strumento dunque, nato per risolvere problemi di natura affine, ma in ambiti molto diversi: dallo studio dell'aerodinamica di aerei e automobili, alla valutazione dell'efficienza della combustione dei motori o del funzionamento di sistemi idraulici di pompaggio o delle perdite di carico nelle condutture.

Dalle applicazioni nel campo dell'ingegneria meccanica o idraulica però, è stato possibile comprenderne anche le grandi potenzialità nell'ambito della progettazione architettonica e civile, quale strumento di essenziale supporto per rispettare i sempre più stringenti limiti di legge imposti sia nell'ambito del comfort e della salubrità degli ambienti interni, sia soprattutto nel campo della sostenibilità energetica e ambientale.

E' sembrato dunque di particolare interesse analizzare il funzionamento e le logiche alla base di questi sistemi con particolare attenzione alle grandi opportunità che possono offrire proprio nel settore dell'ingegneria edile e architettura, sia in fase di progettazione, ma soprattutto, considerando un contesto come quello italiano con enorme patrimonio costruito, in fase di valutazione ed efficientamento dell'esistente, per procedere poi con l'applicazione di questi ultimi ad un caso concreto.

Come caso studio, nello specifico, viene scelta la sala principale del Teatro Carlo Felice di Genova, sia per l'importanza di tale spazio all'interno del contesto genovese e non solo, sia per gli interessanti spunti offerti dal peculiare sistema di ventilazione, sia nell'ambito di un progetto più ampio, il progetto *Storia e Aria*, coordinato dal Professor Pralits, che ha visto coinvolti l'Università degli studi di Genova e il Teatro Carlo Felice.

L'analisi CFD della sala principale costituirà dunque la base per una più ampia valutazione dell'efficienza dei sistemi di condizionamento del teatro, consentendo di analizzare le condizioni di comfort oggi presenti per chi fruisce di tali spazi, sia come lavoratore, sia come spettatore, e di ponderare le ricadute di eventuali interventi futuri.

1. CFD - Fluidodinamica Computazionale

1.1 CFD: di cosa si tratta?

Prima di considerarne le caratteristiche e le potenzialità, è senza dubbio necessario chiarire cosa si intenda con i termini “fluidodinamica computazionale”, o con l’acronimo equivalente di CFD.

Innanzitutto si parla di fluidodinamica, e dunque dello studio, dell’analisi e della simulazione del comportamento dei fluidi; si considerano i fluidi in movimento e come questo influenzi processi complessi che possono prevedere anche scambi di calore o reazioni chimiche, come nel caso della combustione.

Questa disciplina richiede pertanto il ricorso ad un insieme di diverse equazioni che consentano la descrizione dei suddetti fenomeni, che risultano tanto più articolate quanto più la descrizione vuole essere realistica ed accurata; ma il secondo termine aggiunge un elemento in più, l’aggettivo computazionale, infatti, suggerisce che queste equazioni vengono risolte per via numerica, attraverso determinati algoritmi, con l’ausilio di sistemi computazionali, di software ad esse dedicati.

Il ricorso a sistemi computazionali si rende particolarmente utile data la complessità intrinseca del problema, consentendo di ridurre tempi, energie e costi da dedicare all’analisi e allo studio di tali fenomeni, e di svolgere dunque simulazioni più accurate e aderenti alla realtà rispetto a quelle che si potevano prendere in considerazione in assenza di tali mezzi.

I software così utilizzati infatti danno la possibilità di disporre di una sorta di “laboratorio”, di “galleria del vento”¹ virtuali dove è possibile simulare il comportamento dei fluidi, siano essi liquidi o gassosi, anche relativo a condizioni che nella realtà fisica sarebbe proibitivo o impossibile riprodurre, come ad esempio nel caso di oggetti o ambienti fuori scala, di dimensioni troppo grandi o troppo piccole, o per condizioni di temperatura e pressione estreme, come può accadere con la simulazione di malfunzionamenti delle centrali nucleari.

La risoluzione numerica appare dunque come una “terza via” rispetto a quella sperimentale e quella analitica quantomeno nei campi in cui i software hanno raggiunto un buon grado di sviluppo. Come è stato precedentemente detto, da un lato la soluzione analitica non si può quasi mai trovare in forma chiusa per le equazioni differenziali che governano il problema, mentre dall’altro quella per via sperimentale richiede spesso tempi lunghi, alti costi di realizzazione, e pone spesso difficoltà di esecuzione: la via numerica appare dunque un approccio conveniente sotto più punti di vista.

Una volta realizzato dunque il modello, tali software permettono di risolvere problemi di dinamica e termodinamica dei fluidi, potendo ottenere non solo valori numerici relativi ai parametri che descrivono le caratteristiche del fluido come temperatura, pressione, velocità, ma anche rappresentazioni grafiche come mappe, diagrammi, che forniscono informazioni puntuali e globali sulla distribuzione e sull’andamento di tali grandezze in modo chiaro e direttamente visualizzabile.

1.2 Le equazioni della fluidodinamica

Per poter tuttavia ricorrere alla simulazione via software è fondamentale comprendere quali siano i principi alla base di questi complessi fenomeni, e dunque quale possa essere l'effettivo contributo che questi nuovi sistemi possono dare nella risoluzione di dati problemi.

I principi fondamentali che possono essere individuati alla base del comportamento di un fluido sono sostanzialmente tre²:

- la conservazione della massa
- la seconda legge di Newton (conservazione del momento)
- la conservazione dell'energia

Tali principi si traducono poi, a seconda del modello scelto per la descrizione del comportamento del fluido, in equazioni che possono assumere diverse formulazioni, ma che, nel complesso, risultano essere delle equazioni differenziali alle derivate parziali, e proprio per questo motivo risulta necessario ricorrere a metodi numerici che consentano di discretizzare il continuo, e di trasformare le equazioni differenziali in equazioni algebriche.

In particolare dal primo principio, quello di conservazione della massa, discende l'equazione di continuità, che può essere così formulata³:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

in cui:

ρ è la densità del fluido;

\mathbf{v} ne rappresenta la velocità nelle sue componenti lungo x,y,z;

t è il tempo;

o, nel caso di un fluido incompressibile, dunque caratterizzato da densità ρ costante, può assumere tale formulazione:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

Analogamente dal secondo principio deriva l'equazione relativa alla conservazione della quantità di moto. A partire infatti dalla seconda legge di Newton:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (3)$$

Dove:

\mathbf{F} è il vettore forza;

m è la massa;

e a è il vettore che rappresenta l'accelerazione.

Considerando l'accelerazione come derivata della velocità rispetto al tempo, e le forze in gioco, forze di massa e di superficie (le prime possono non essere inserite se consideriamo ancora una volta costanti le proprietà del fluido, mentre per le seconde si possono far corrispondere le variazioni in termini di tensioni a gradienti di velocità), si giunge alla formulazione per ciascuna delle tre componenti lungo x , lungo y e lungo z , delle equazioni di Navier-Stokes⁴:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (6)$$

dove:

u, v e w rappresentano le componenti rispettivamente lungo x , y , e z delle velocità del fluido nel caso di densità costante;

P ne rappresenta la pressione;

ρ è la densità del fluido;

t è il tempo.

Infine dall'ultimo principio, dalla seconda legge della termodinamica e cioè che la variazione nel tempo dell'energia corrisponde alla somma delle variazioni del netto del calore trasferito al volume di controllo e del lavoro compiuto dal sistema, considerando la formulazione della legge di Fourier relativa alla conduzione del calore, si ottiene la seguente formulazione del bilancio dell'energia, necessaria in presenza di scambio di calore⁴:

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (7)$$

in cui:

u, v e w rappresentano le componenti rispettivamente lungo x , y , e z delle velocità del fluido;

ρ è la densità del fluido;

t è il tempo;

T è la temperatura del fluido;

k ne rappresenta la conducibilità termica;

C il calore specifico.

Come appare subito evidente la complessità di tali problemi, descritti da un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali, che di per sé non permettono di trovare una soluzione in forma chiusa, richiede il ricorso a metodi numerici. Il problema delle equazioni non risolubili in forma chiusa è da attribuire prevalentemente a tre ragioni⁵:

- si tratta di problemi perlopiù tridimensionali;
- le equazioni sono fortemente accoppiate e non lineari;
- nei problemi di ingegneria il dominio delle soluzioni è spesso complesso.

Questo accade ad esempio, nei sistemi in cui alla convezione forzata si affianca la convezione naturale, in cui entra in gioco anche la forza di galleggiamento, con la densità del gas che varia in funzione del ΔT considerato, per i quali si richiede dunque di ipotizzare a priori un campo di temperatura, risolvere le equazioni per procedere poi iterando; o ancora in presenza di un moto del fluido che non possa essere ricondotto al modello del moto laminare e che richiede dunque di ricorrere ad un modello di turbolenza in grado di descrivere le fluttuazioni delle grandezze caratterizzanti il moto del fluido rispetto al valore medio.

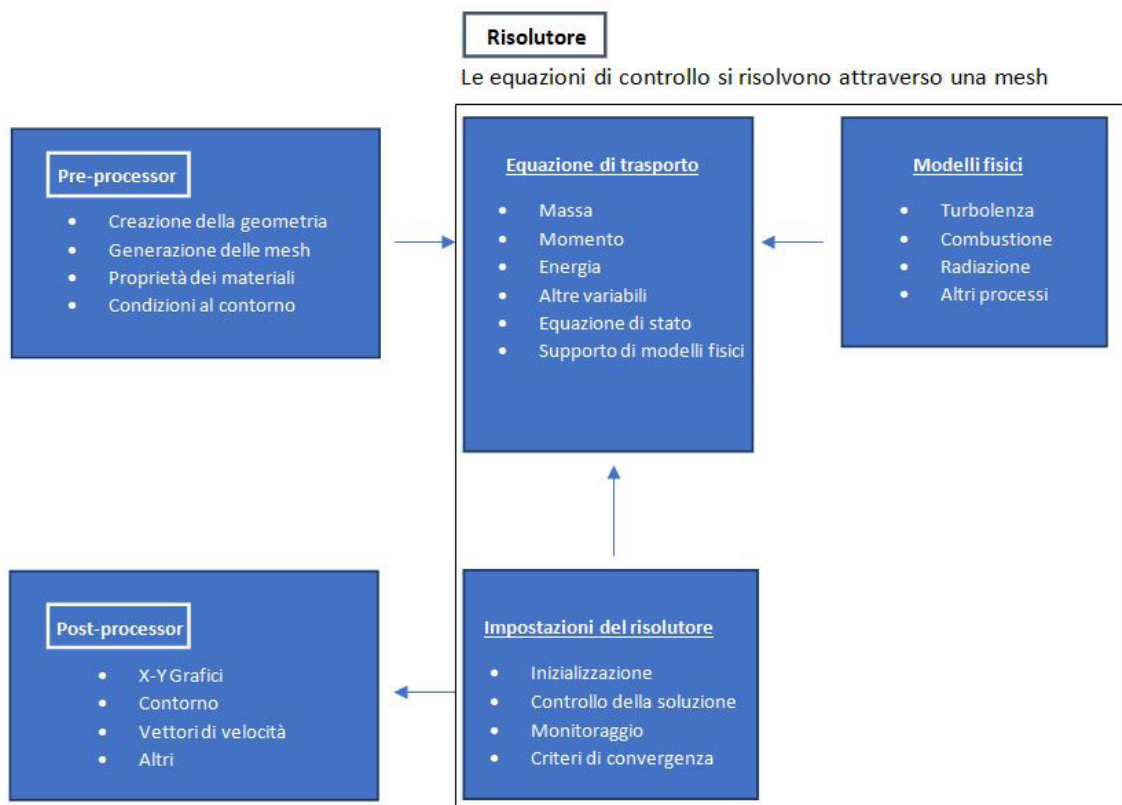
Si rende così necessario l'utilizzo di software e di sistemi che si basano sulla discretizzazione del continuo e sulla trasformazione delle equazioni differenziali alle derivate parziali in equazioni algebriche, così da consentire la soluzione del problema; per fare ciò tuttavia si deve comprendere quali siano i criteri, le assunzioni, i principi che portano alla definizione del modello numerico che può consentire di compiere questo balzo in avanti.

1.3 La simulazione numerica

Quando si parla di simulazione numerica nel campo della fluidodinamica, si sta di fatto solo definendo l'obiettivo di massima: quello di risolvere un problema avvalendosi di software, di sistemi numerici che a partire da un modello fisico e dalle condizioni al contorno, produrranno dei risultati ottenuti attraverso l'impiego di precisi algoritmi.

Come è evidente si tratta di una definizione estremamente vaga che però può costituire il punto di partenza per tracciare i passi fondamentali, per definire una procedura di massima comune alla maggior parte dei software disponibili per questo tipo di analisi.

Si distinguono, all'interno del processo, sostanzialmente tre momenti, un'impostazione del problema, eseguita dal *pre-processore*, la soluzione vera e propria compiuta dal solutore ed infine un'elaborazione dei risultati attraverso il *post-processore*. Ognuno di questi momenti si struttura poi su una serie di operazioni che consentono di elaborare progressivamente l'analisi, come mostra questo grafico spesso riproposto in letteratura⁴.



Volendo quindi tracciare uno schema di base del funzionamento dei software di CFD si potrebbero definire sei macrofasi:

- a) definizione del problema
- b) discretizzazione
- c) definizione del modello fisico e numerico, con relative condizioni al contorno
- d) soluzione numerica
- e) analisi della soluzione
- f) risultati

Queste fasi possono poi essere declinate in forma diversa a seconda delle specificità del problema e dunque dei modelli da impiegare, dei software a cui ricorrere, del grado di precisione e affidabilità richiesta all'analisi.

In ogni caso il primo passo è senza dubbio quello della definizione del problema: è fondamentale infatti inquadrare precisamente la natura del fenomeno in questione per impostare tutte le fasi successive.

- a) Bisogna dunque definire la geometria, che andrà riprodotta digitalmente su un software *cad* o su piattaforme ad esso analoghe, che siano compatibili con il software che si andrà ad utilizzare, con un grado di astrazione e semplificazione che dovrà essere stabilito in maniera congrua alla natura e alla scala del problema che si an-

drà ad affrontare. Sarà necessario altresì valutare se il problema possa essere trattato bidimensionalmente o piuttosto ricorrere ad un più laborioso modello 3D e, se, in questo caso, si possa ricorrere ad altre assunzioni: ad esempio se la struttura fosse perfettamente simmetrica si potrebbe pensare di considerare solo metà del modello definendo appropriate condizioni al contorno. Non bisogna infatti mai dimenticare che, per quanto oggi i computer forniscano sempre maggiori potenze di calcolo, le analisi CFD costituiscono in ogni caso un notevole onere ed è quindi sempre utile cercare di ridurre tutti gli elementi che si possono ritenere superflui.

Definita la geometria ed ottenuta una sua rappresentazione digitale, si ottiene quello che sarà il volume di controllo, il dominio all'interno del quale si svolgerà l'analisi. A questa fase solitamente segue quella della discretizzazione.

b) Come si è detto infatti, non essendo possibile trovare una soluzione in forma chiusa alle equazioni che governano i problemi di fluidodinamica, si ricorre alla fluidodinamica computazionale e dunque a software che trasformando il continuo in un sistema discretizzato, trattano le equazioni differenziali alle derivate parziali come equazioni algebriche e procedono poi iterando.

Definito il volume di controllo, si procede dunque con la sua discretizzazione, con la sua *meshatura*. La forma, le dimensioni e dunque il numero delle *mesh* vanno definite in funzione del problema considerato, della geometria e di ciò che si vuole ottenere dall'analisi.

Si crea così una suddivisione del dominio in sottodomini discreti più piccoli che consentiranno l'analisi del flusso in forma numerica e restituiranno valori altrettanto discretizzati di velocità, pressione e temperatura, ad esempio, che porteranno alla soluzione del problema.

Per quanto riguarda la forma esse sono bidimensionalmente dei poligoni, generalmente celle triangolari, e in questo caso si parla di *mesh non strutturate*, o quadrangolari, definite *mesh strutturate*, o ancora, possono essere realizzate *mesh "miste"*, che a causa di una geometria particolarmente complessa richiedono l'impiego di entrambe, che nel caso di analisi tridimensionali acquisiscono anche uno sviluppo volumetrico e dunque si configurano come tetraedri o esaedri.

Considerando poi la dimensione e quindi il numero, essa varia a seconda della geometria, della scala del sistema e dell'accuratezza dell'analisi; ad esempio si potrebbe decidere di definire una certa dimensione "media" per le celle in cui viene discretizzato il dominio, ma di voler infittire la maglia in corrispondenza di punti "notevoli" o "critici" per cui può essere utile disporre di dati più accurati e puntuali, assegnando dunque alle *mesh* di queste aree dimensioni minori, per ottenere più "punti di controllo".

La discretizzazione può avvenire sostanzialmente seguendo tre approcci:

- il metodo ai volumi finiti
- il metodo agli elementi finiti
- il metodo alle differenze finite

Con il metodo ai volumi finiti (FVM), il dominio viene suddiviso in volumi elementari, le equazioni devono essere integrate all'interno dei volumi sui confini dei quali sono imposte le condizioni al contorno, a partire dalle relazioni che intercorrono tra i volumi elementari, esse vengono risolte per via numerica. Si tratta dell'approccio standard utilizzato nella maggior parte dei software di CFD. Esso risulta applicabile ad ogni tipo di geometria, anche le più complesse, vista la possibilità di servirsi di *mesh strutturate* e non; inoltre la conservazione delle proprietà è garantita all'interno delle celle di controllo.

Per quanto riguarda invece il metodo agli elementi finiti (FEM) esso si basa sulla discretizzazione secondo una griglia di calcolo, costituita da elementi di forma elementare; su ogni elemento la soluzione viene trovata come una combinazione lineare delle funzioni di forma. Si applica solitamente alle analisi strutturali, ma talvolta anche ai fluidi.

Questo avviene quando un parametro è dell'ordine delle decine di migliaia, questo parametro è il numero di Reynolds, così definito:

$$Re = \omega L / \nu \quad (8)$$

dove:

ω è la velocità del fluido;

L è la lunghezza caratteristica del problema in analisi;

ν è la viscosità cinematica che rappresenta sostanzialmente la resistenza che il fluido oppone al movimento se sottoposto a sforzi tangenziali;

Esso è particolarmente adatto ai casi in cui il dominio è variabile o caratterizzato da una geometria particolarmente complessa, ed è dunque richiesto un grado di raffinatezza e precisione non omogeneo sul dominio, e dunque una maglia più o meno fitta, o quando la soluzione risulta irregolare.

Infine il metodo alle differenze finite (FDM) si basa sull'approssimazione delle derivate a differenze finite. Si applica per lo più a geometrie semplici anche perché richiede spesso la realizzazione di *mesh strutturate* e dunque caratterizzate da una maglia regolare costituita da celle quadrangolari; è inoltre difficile verificare che la conservazione delle proprietà sia rispettata per ogni elemento di controllo, diversamente da quanto accade per i volumi finiti.

Una volta realizzata la *meshatura*, si deve definire il modello fisico e dunque le equazioni che governano il fenomeno.

c) A questo punto, prima di passare all'analisi, e dunque alla soluzione del problema è fondamentale definire il modello fisico da adottare per descrivere il fenomeno e, di conseguenza, quello numerico che verrà impiegato nella simulazione.

Nel momento in cui viene scelto il modello fisico più adeguato a descrivere il fenomeno da analizzare, di fatto si definisce quali sono le equazioni che lo governano e quindi quali saranno i termini del problema da risolvere.

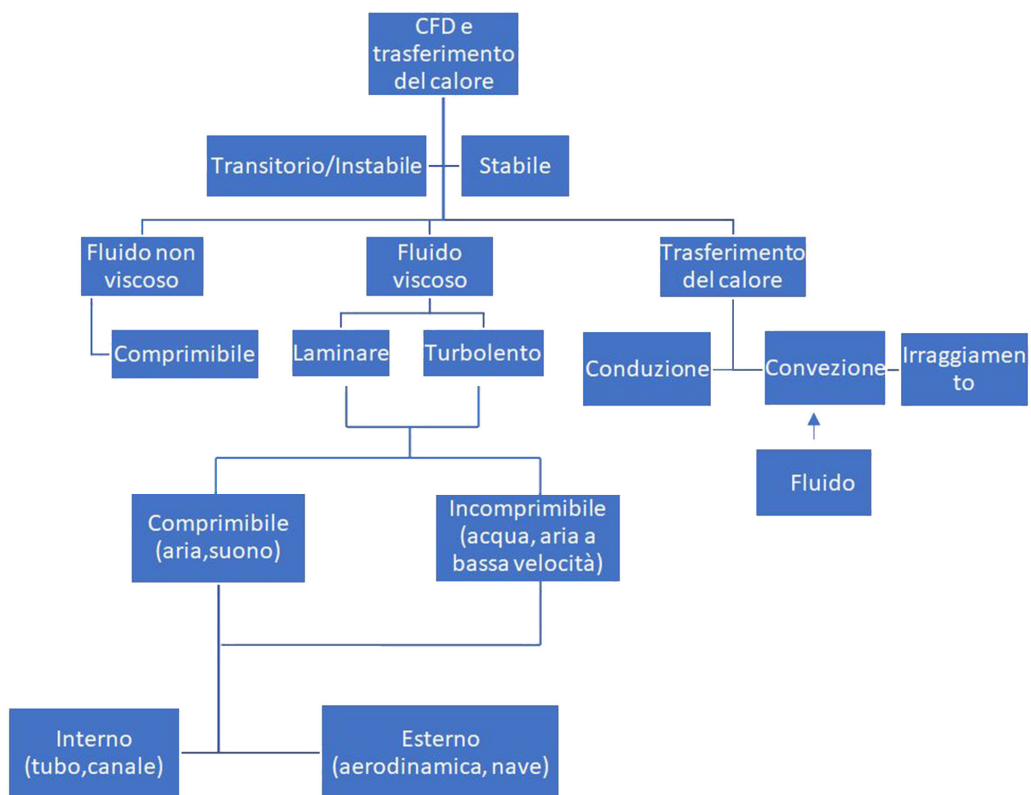
Questo dipende da una molteplicità di fattori.

In primo luogo è necessario definire se si vuole studiare il problema in regime transitorio o stazionario; secondariamente si deve procedere con l'identificazione del fluido, liquido o gassoso, o nello specifico aria, acqua etc, e delle sue caratteristiche, se si tratta cioè di un fluido viscoso o meno, comprimibile o incompressibile, inserendo anche valori relativi alle proprietà specifiche come la densità o la viscosità, che possono già essere presenti e dunque ricavati dalla libreria del software relativa ai materiali.

Si deve poi tener conto della presenza o meno di scambio di calore e della forma con cui esso può avvenire, per conduzione, convezione naturale e/o forzata, irraggiamento, considerando quale sia la forma prevalente o, se richiesto dalla specificità del problema, la combinazione di più forme.

Non si può prescindere infine dal tipo di moto: se si può cioè considerare il flusso come laminare o turbolento, e cioè in dipendenza del numero di Reynolds.

Il percorso può quindi essere visto come un diagramma di flusso come il seguente, spesso riproposto in letteratura.⁴



Nel momento in cui diverse cause di disturbo, come la scabrezza delle pareti o la corrente stessa, interferiscono con il flusso laminare causando in esso delle fluttuazioni casuali tende ad assumere un andamento caotico, turbolento appunto, che si associa ad alti valori del numero di Reynolds.

In questo caso dunque all'interno della simulazione si richiederà anche di definire il modello di turbolenza che si vuole adottare, e all'interno della grande varietà di modelli che i software possono presentare, si possono riscontrare tre famiglie di modelli:

- a Simulazione Numerica Diretta (DNS)
- Large Eddy Simulation (LES)
- a Equazioni mediate alla Reynolds (RANS)

Nel primo caso le equazioni di Navier-Stokes vengono risolte numericamente nella forma che rappresenta il caso tridimensionale e non stazionario; i dati relativi alla turbolenza si ottengono con una media temporale e/o spaziale. Si tratta del modello più complesso e oneroso in termini di costi e tempi, in quanto si deve risolvere tutto il range della turbolenza, dalle scale maggiori a quelle più piccole, richiedendo di discretizzare in un numero altissimo di celle il volume di controllo (dell'ordine di 10^{12}), e, di conseguenza si può applicare solo ai casi più semplici: geometrie schematiche e moto debolmente turbolento.⁶

Nel secondo invece si parte dalla considerazione che il contributo più rilevante e caratterizzante del singolo moto turbolento, sia dato dalla turbolenza a grande scala e quindi solo questa viene simulata numericamente risolvendo le equazioni di Navier-Stokes in forma tridimensionale e non stazionaria, mentre le scale inferiori sono modellate in maniera semplificata, per tenerne conto senza risolverle. Si tratta di un metodo meno laborioso, applicabile anche ad impieghi pratici, di natura industriale (maggiori numeri di Reynolds), ma risulta di difficile attuazione la stima dell'errore e la scelta dei modelli per rappresentare la scala inferiore della turbolenza.

Infine il modello RANS si basa sul concetto che a fini ingegneristici, sia sufficiente conoscere i valori medi delle grandezze caratteristiche come il coefficiente d'attrito o il coefficiente di scambio termico. Di conseguenza esso opera mediando queste grandezze su un intervallo di tempo infinito (se regime stazionario) o molto grande (se transitorio), e considerandole come costituite da un valore medio cui si somma una fluttuazione. Si generano così degli sforzi aggiuntivi, i cosiddetti sforzi di Reynolds, e dunque per la risoluzione si ricorre ad ulteriori equazioni. Si tratta di un modello semplificato che consente di ridurre notevolmente gli oneri di calcolo⁸. A questa famiglia appartiene il modello k- ϵ , un modello a due equazioni, largamente utilizzato nelle simulazioni CFD.

Tutto ciò influenzerà la definizione delle equazioni alla base del problema, e la relativa formulazione: ciò costituisce dunque la base dell'impostazione del problema.

Considerando poi che si tratta usualmente di equazioni differenziali alle derivate parziali, è altresì necessario definire le condizioni al contorno.

Si devono infatti specificare le proprietà del fluido all'interno del dominio, ma soprat-

tutto quelle in corrispondenza della frontiera, che costituiscono il punto di partenza per la risoluzione del problema.

Esse possono essere rappresentate da determinati valori di temperatura, pressione, velocità, da una determinata portata di fluido in ingresso o in uscita, dal fatto che ci sia o meno trasferimento di calore dall'esterno all'interno del dominio e viceversa.

E' dunque necessario definire la direzione del flusso, può essere necessario stabilire il profilo di velocità in ingresso e uscita, le condizioni di temperatura, pressione alle estremità, se si tratta di una trasformazione adiabatica, isoterma e, come è stato precedentemente evidenziato se si possono introdurre semplificazioni quali la simmetria o la ripetitività.

Queste condizioni infatti consentono di trattare un problema meno complesso proprio a partire da particolari condizioni al contorno che consentono di non prendere in analisi l'intera geometria del volume di controllo.

d) Si procede a questo punto con la simulazione numerica vera e propria e, dunque, con la soluzione del problema. Si richiede una fase preliminare di inizializzazione dove possono essere definite le condizioni iniziali del problema e possono essere inseriti altri valori relativi all'esecuzione dell'analisi vera e propria. Il software procede infatti alla risoluzione delle equazioni in maniera iterativa: essendo esse fortemente non lineari e accoppiate, si richiede di procedere per iterazioni successive: il numero delle iterazioni viene definito a priori, in base all'accuratezza e alla precisione che si richiede al risultato e la bontà di questa scelta fatta a monte del calcolo può essere monitorata su grafici che i software forniscono durante l'analisi per monitorarla che danno una misura dei valori residuali, e cioè dello scarto tra la soluzione che si dovrebbe ottenere dall'equazione nella sua forma continua e quella della stessa equazione in forma discreta, dell'errore derivante dall'approssimazione che si considera accettabile, che mano a mano che si procede iterativamente separano dalla convergenza. A priori viene anche stabilita una "tolleranza", un valore soglia accettabile per poter considerare di aver effettivamente raggiunto la convergenza (di solito dell'ordine di 10^{-3} - 10^{-4}).

e) Una volta raggiunta, al termine della simulazione numerica, si passa all'analisi della soluzione, alla fase cioè di *post-processing*, in cui vengono visualizzati gli esiti dell'analisi, e si possono da essi ricavare mappe relative alla distribuzione delle diverse caratteristiche del moto del fluido, dati puntuali per nodi di particolare interesse, l'andamento generale di alcune grandezze, grafici: tutto ciò concorre a facilitare l'analisi e la comprensione del fenomeno, ma consente anche una successiva comunicazione di quanto ottenuto, dei risultati della suddetta analisi.

f) La maggior parte dei software CFD comprende infatti una molteplicità di strumenti di rappresentazione dei risultati che, a seconda delle specificità del problema, consentono di visualizzarne immediatamente gli aspetti caratteristici. E' dunque possibile ottenere elaborati semplici come tabelle relative alle variabili in gioco per ogni punto di controllo, o grafici cartesiani in xy sull'andamento delle suddette variabili;

ma possono anche essere elaborati sistemi di rappresentazione più sofisticati come i *vector plots* (Fig. 1.1) che forniscono un andamento del flusso descritto da vettori più o meno grandi e secondo un gradiente di colori, rappresentativi delle singole celle della mesh che consente di visualizzare in maniera chiara la direzione del flusso e di rintracciare eventuali fenomeni locali; o ancora i *contour plots* (Fig. 1.2), forse i grafici più usati, che attraverso delle isolinee forniscono una rappresentazione qualitativa delle intensità variabili dei diversi parametri in gioco; per arrivare fino alla possibilità di realizzare delle vere e proprie animazioni per poter cogliere meglio l'evoluzione del fenomeno nel tempo.

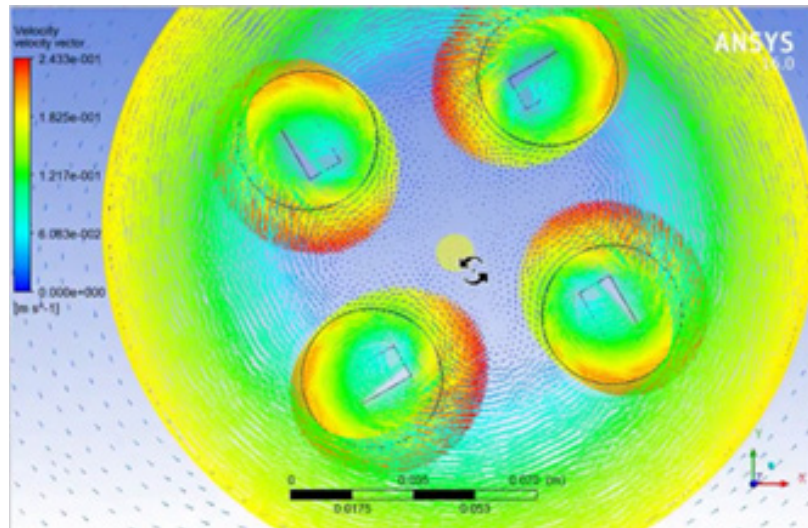


Fig. 1.1-Esempio di vector plot ottenuto in fase di post-processing con Ansys

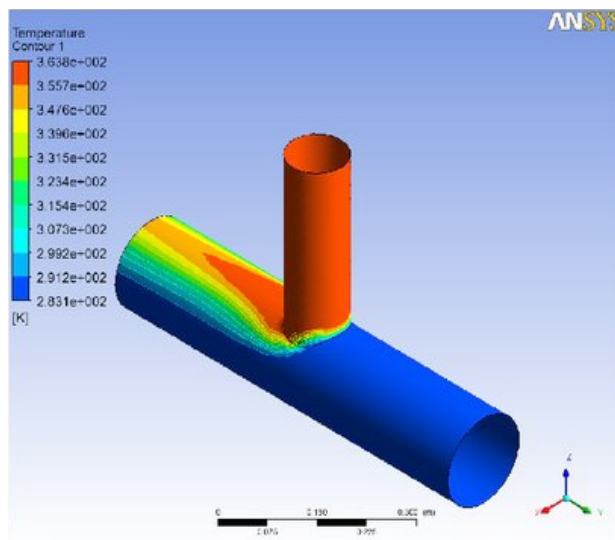


Fig. 1.2-Esempio di contour plot ottenuto in fase di post-processing con Ansys

Dopo aver analizzato dunque le fasi principali secondo cui un software CFD opera, può essere interessante vederne le possibili applicazioni nel mondo della progettazione ingegneristica ma non solo.

1.4 Le applicazioni della CFD

La fluidodinamica computazionale ha incontrato negli ultimi anni un notevole sviluppo, in quanto fornisce soluzione a problemi molto complessi, altrimenti irrisolvibili, che interessano i più svariati campi dell'attività umana.

Problemi di fluidodinamica sono infatti riscontrabili in quasi tutti i campi dell'agire dell'uomo: dal sistema di condizionamento delle case, all'impiego di un'automobile o di un qualsiasi altro mezzo di trasporto, a diversi campi della medicina.

I primi impieghi della CFD sono stati quelli nel campo dei modelli di previsione nel campo della meteorologia già a partire dagli anni cinquanta¹, dove veniva richiesta un'enorme potenza di calcolo per eseguire un'analisi su vastissima scala.

Successivamente, quando le potenze di calcolo dei computer in commercio hanno iniziato a crescere tali strumenti hanno preso sempre più campo, ed hanno aperto la strada ad una grande gamma di temi e problemi che fino a quel momento non erano neanche stati presi in considerazione.

I software CFD hanno consentito in primo luogo di rendere affrontabili in sede didattica problemi molto complessi che prima, in assenza di mezzi tecnici idonei, venivano relegati alla ricerca pura, rimanendo dunque spesso inaccessibili alla maggioranza degli studenti aspiranti ingegneri.

Secondariamente, e senza dubbio con ben più massivo impatto, essi hanno rivoluzionato il modo di progettare e valutare in quasi tutti i campi dell'ingegneria e non solo. Si presentava infatti la possibilità di avere, in tempi sempre più brevi, "un'anteprima", una simulazione appunto, del funzionamento di un qualsiasi prodotto, impianto, sistema, di poterne cogliere rapidamente punti di forza e debolezze, potendo dunque correre rapidamente ai ripari per ridurre queste ultime e ottimizzare il processo.

In un periodo storico in cui il cambiamento climatico, l'esaurimento delle risorse, impongono di rendere i processi sempre più efficienti, di ridurre le emissioni di inquinanti, e contemporaneamente, si richiede di essere sempre più performanti nella competizione globale, appare evidente come questi strumenti si siano presentati come la soluzione più logica e immediata.

Tali simulazioni sono state utilizzate per il progetto e la successiva analisi di macchinari nel campo dell'idraulica: sistemi di pompaggio, valvole, condutture. In questo modo si può ad esempio tentare di ridurre le perdite di carico, ottimizzare il funzionamento e rendere il sistema più efficiente simulando il flusso interno e potendo prevedere eventuali malfunzionamenti dovuti a difetti di progettazione.

Essi vengono ampiamente usati anche nell'ambito dell'ingegneria meccanica, nel progetto di turbine e motori a combustione, di scambiatori di calore, di singole parti cioè, ma anche di interi impianti ideati ad esempio per produrre energia, per rendere più efficienti i sistemi di combustione e propulsione, consentendo la simulazione di suddetti fenomeni ed evidenziandone quindi eventuali carenze. Dal punto di vista ambientale, inoltre, i software di questo tipo consentono di misurare e visualizzare l'emissione degli inquinanti derivanti ad esempio dalla combustione all'interno di un motore o dal processo produttivo di una centrale, e que-

sto permette di conformare il progetto, già a partire dalle prime fasi, ai limiti di legge sempre più rigorosi.

Dal punto di vista della progettazione meccanica, navale o aeronautica la CFD fornisce anche potenti mezzi per lo studio dell'aerodinamica di automobili, aerei e imbarcazioni; con questi sistemi è infatti possibile "ottimizzare" la configurazione esterna delle parti, per ridurre ad esempio l'attrito con l'aria o con l'acqua, costituendo una sorta di galleria del vento naturale in cui simulare l'impatto dei mezzi con il fluido. Nel campo della aerodinamica la fluidodinamica computazionale ha fornito un contributo così decisivo che è stata utilizzata addirittura in campo sportivo per migliorare l'attrezzatura della squadra olimpica britannica, ma anche per migliorare il gesto tecnico dei nuotatori della squadra statunitense, essendo dunque riconosciuta dalle rispettive federazioni come uno strumento tanto innovativo quanto incisivo.

Nell'ambito civile la CFD ha poi trovato largo impiego sia per il progetto e l'analisi dei sistemi di riscaldamento e condizionamento estivo, per i sistemi di ventilazione in generale, ma anche nel caso di ambiti più specifici come ad esempio la progettazione antincendio. Anche in questo campo, infatti, è di cruciale importanza la possibilità di prevedere il flusso dell'aria, sia per comprendere quali siano i meccanismi che possono avere luogo all'interno dell'edificio, quali possono essere ad esempio le zone maggiormente critiche dove ci possono essere concentrazioni di CO₂ più importanti; sia per capire come rendere più efficienti gli impianti che si attivano in caso di emergenza. Anche il Codice italiano di Prevenzione Incendi (D.M. 3/08/2015), infatti, ha recepito queste istanze inserendo la CFD all'interno dei metodi consentiti per la progettazione antincendio.

Restando sempre nell'ambito civile, tali sistemi consentono di condurre valutazioni sull'efficienza energetica degli edifici, sulle dispersioni nell'ambiente e sulla salubrità degli ambienti interni (valori di umidità relativa o concentrazioni di CO₂), consentendo anche in questo caso di verificare già in fase di progettazione digitale il rispetto delle stringenti norme in materia ambientale e di comfort abitativo.

Esiste infine un altro campo di applicazione delle analisi CFD che sta incontrando un particolare sviluppo soprattutto negli ultimi anni, quello medico.

La possibilità di questi software di simulare il comportamento anche di fluidi non newtoniani come il sangue, ha consentito di estenderne l'uso anche allo studio dei flussi di fluidi fisiologici, riducendo tempi, costi e problematiche relative ad esperimenti che altrimenti sarebbero stati condotti materialmente in laboratorio, ma anche al progetto, sviluppo e ottimizzazione di dispositivi medici⁷ soprattutto per quanto riguarda il sistema cardiovascolare. Parallelamente tali sistemi hanno consentito ad esempio di valutare l'efficacia di cure via spray o aerosol, permettendo di simulare la somministrazione del medicinale per via aerea così da renderle sempre più mirate e performanti.

E' quindi evidente come questi software trovino largo impiego nei più svariati campi, grazie alla possibilità di regolare una molteplicità di parametri riguardanti il tipo di fluido, il tipo di moto, l'apporto o meno di energia durante il processo, spesso a partire dallo stesso strumento numerico. Tutto ciò ha condotto ad un progressivo sviluppo di numerosi programmi in grado di svolgere queste analisi, da quelli di uso commerciale come *Fluent* di *Ansys*, come la piattaforma di *Comsol*, come *Phoenix* di CHAM, o come il software elaborato da *Autodesk*, a quelli opensource come *OpenFOAM*.

1.5 HVAC: un'applicazione dell'analisi CFD

Come è stato precedentemente evidenziato, uno dei principali campi di applicazione in ambito civile è sicuramente quello dello studio e dell'analisi dei sistemi di ventilazione, riscaldamento e condizionamento estivo. Questo settore, nella letteratura anglosassone viene descritto con l'acronimo omnicomprensivo HVAC: *Heating, Ventilation and Air Conditioning*, che consente di fare univocamente riferimento a tutte le tematiche connesse alla fluidodinamica all'interno degli edifici.

Si inizia infatti a ricorrere a questa terminologia quando, in particolari settori, quali la progettazione di grattacieli o di aeroporti, in cui dati i limiti tecnici intrinseci dati dalle grandi altezze o dalla funzione specifica, impongono una particolare cura nel progetto di un efficiente sistema che sia in grado di garantire aria salubre e ad una temperatura congrua con un adeguato livello di comfort interno.

L'utilizzo dell'analisi CFD all'interno di questa disciplina infatti può avere sostanzialmente due obiettivi fondamentali: il primo è quello di realizzare, in fase di progetto, e mantenere, durante l'uso, un impianto efficiente dal punto di vista delle prestazioni energetiche: minimizzare i consumi, evitare o ridurre al minimo le dispersioni, massimizzarne la resa; il secondo è invece quello di garantire il comfort interno, di far sì cioè che, non solo siano rispettati i limiti di legge, ma anche che gli occupanti non si trovino in condizioni di disagio dovute ad "effetti collaterali" dell'impianto.

Spesso infatti pur trovandosi in presenza di un impianto ben funzionante, che garantisce congrui livelli di temperatura e umidità relativa, si possono creare correnti, getti d'aria localizzati, dovuti ad un'eccessiva velocità di immissione dell'aria o alla geometria stessa dell'ambiente che viene condizionato. Questo in assenza di simulazioni numeriche, era pressoché impossibile da prevedere, talvolta da rilevare in maniera oggettiva e da correggere. Oggi la possibilità di studiare il flusso dell'aria a partire dalla geometria del problema, consente di poter visualizzare direttamente in fase di progettazione o, successivamente, in fase di valutazione, eventuali correnti localizzate e, governando i parametri regolabili, si può tentare di risolvere il problema o, quanto meno, di ridurlo o di prendere misure per mitigarne gli effetti.

Analogamente l'analisi CFD consente di valutare la presenza di inquinanti o di sostanze come la CO₂ e le relative concentrazioni così da poter condurre indagini anche sulla qualità dell'aria, così da poter ad esempio disporre dei dati necessari per poter variare il numero di ricambi d'aria, pur rimanendo sempre all'interno dei limiti di legge, che però potrebbero non contemplare casi specifici in cui contestualmente si potrebbero verificare dei problemi.

Data le potenzialità di questo tipo di analisi all'interno del suddetto ambito, sono stati sviluppati numerosi studi in letteratura per valutare l'efficienza degli impianti, ma anche il comfort degli occupanti, per teatri, auditorium, aule universitarie, sale operatorie, cinema.

Per tutti quegli ambienti pubblici in cui si richiede una permanenza prolungata e confortevole dunque si è cercato, sia in fase di progettazione che di valutazione successiva, di simulare i flussi dell'aria per disporre dei dati necessari per conoscere, prevenire o intervenire su eventuali problemi esistenti.

1.6 I casi studio in letteratura

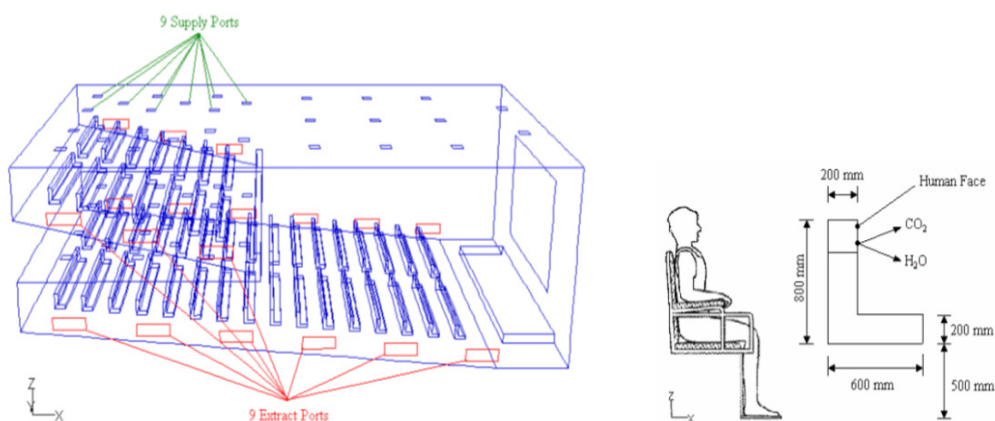
Tra i numerosi studi in letteratura sull'applicazione delle analisi CFD nell'ambito dei sistemi HVAC, può essere utile sottolinearne alcuni che, per analogia con il caso che sia andrà ad analizzare o solamente per l'impostazione della valutazione che è stata condotta, possono risultare particolarmente interessanti e chiarire ancora una volta quali siano le potenzialità di questi sistemi numerici in ambito civile.

Un primo caso che può essere utile analizzare è quello proposto da Gamal El-Hariry, Essam E. Khalil e Waleed Abdel-Samee dell'Università del Cairo⁸.

Essi propongono un'analisi tridimensionale CFD per la valutazione del comfort termico interno e della qualità dell'aria di un anfiteatro in cui è attivo un sistema di condizionamento.

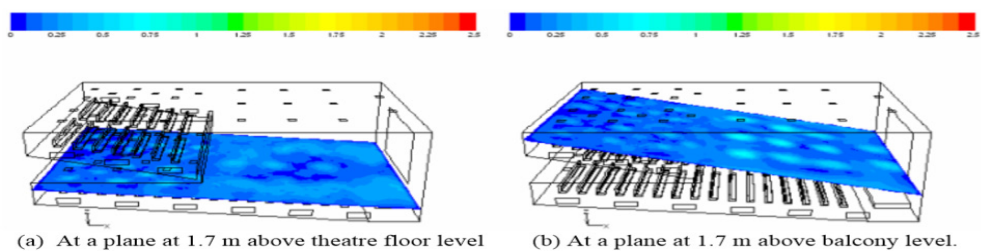
Essa viene condotta con il software *Fluent*, utilizzando un modello discretizzato secondo il metodo dei volumi finiti, il più diffuso, in 600 000 celle di controllo che rappresenta la sala principale che riceve il ricambio dell'aria dalle bocchette posizionate sul soffitto e il relativo smaltimento da quelle poste nella parte inferiore delle pareti laterali. Avendo come obiettivo dell'analisi la valutazione di comfort e salubrità dell'aria, non è sufficiente simulare le semplici condizioni di immissione dell'aria all'interno della geometria dell'anfiteatro (Fig. 1.3a), risulta infatti di importanza cruciale la presenza degli spettatori.

Essi introducono dunque anche un modello per simulare la presenza umana (Fig. 1.3b) cui attribuire i dati relativi alla temperatura del corpo umano, alla quantità di calore che esso cede all'ambiente, all'umidità e all'anidride carbonica che ciascun individuo immette nella sala ricavati a loro volta da normative e letteratura.

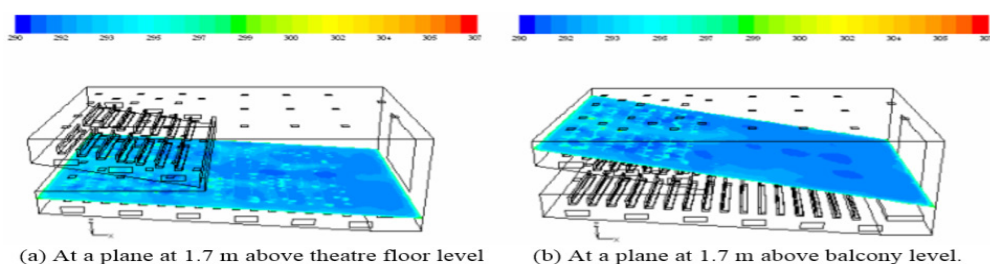


Figg. 1.3 a-1.3b-Modellazione della geometria della sala e della presenza degli spettatori nel lavoro di El-Hariry, Khalil, Abdel-Samee

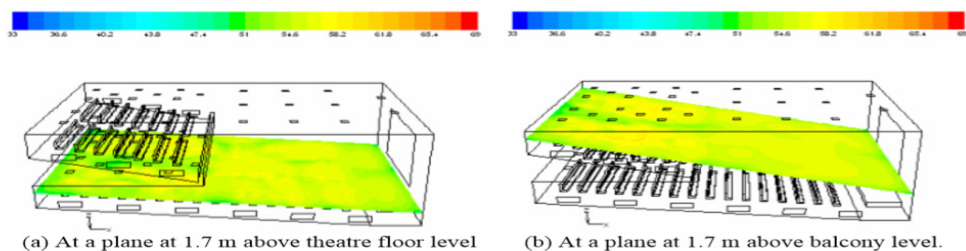
Inserito il modello rappresentante la presenza umana all'interno dell'anfiteatro si procede dunque con la simulazione per ottenere dati relativi all'andamento e distribuzioni di alcuni precisi parametri: la velocità del flusso, la temperatura dell'aria, l'umidità relativa e la concentrazione di CO_2 .



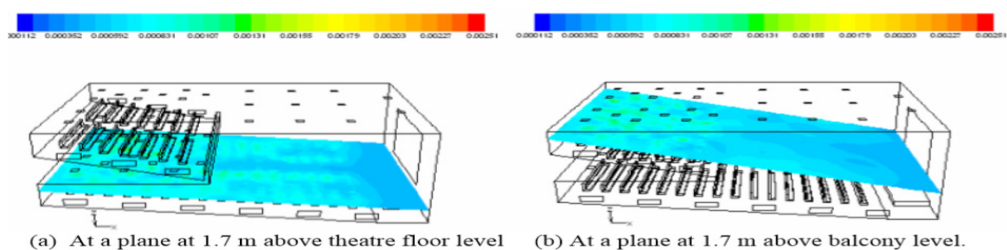
a. Velocità del flusso (m/s)



b. Temperatura dell'aria (K)



c. Umidità relativa (Rh%)



d. Concentrazione di CO₂

Infine, ottenuti i risultati dalla simulazione, lo studio si conclude con il confronto tra i valori ottenuti e quelli indicati come ottimali per il comfort interno, così da verificare quale sia il livello attualmente raggiunto, quali possano essere i margini di miglioramento e, nel caso quali possano essere le misure da mettere in atto per conseguirli.

In questo studio si possono ravvisare alcune caratteristiche specifiche, peculiari che vale la pena sottolineare: viene condotta un'analisi tridimensionale su un modello discretizzato con il metodo dei volumi finiti sulla sala di un teatro con bocchette di areazione sul soffitto e bocchette di ripresa nella parte inferiore delle pareti; si decide di simulare una sola situazione, con la sala piena e con aria immessa a 289 K. Nella valutazione del comfort vengono presi in considerazione velocità, temperatura dell'aria, umidità relativa e concentrazione di anidride carbonica.

A partire dallo stesso obiettivo però Sebastian ValeriuHudisteanu e Catalin George Popovici nel 2015⁹ conducono una simulazione un po' differente, scelgono infatti una geometria bidimensionale per rappresentare la sala principale del teatro di Jassy, di più rapida elaborazione anche se qui di base la sezione trasversale presenta una forma più articolata, che viene considerata dallo stesso software *Fluent* come un solido di profondità standard di un metro; questa volta vengono dunque utilizzate circa 10 000 elementi piani per la discretizzazione della sala che qui riceve l'aria dal basso e la riemette dalle bocchette di ripresa sul soffitto(Fig. 1.4).

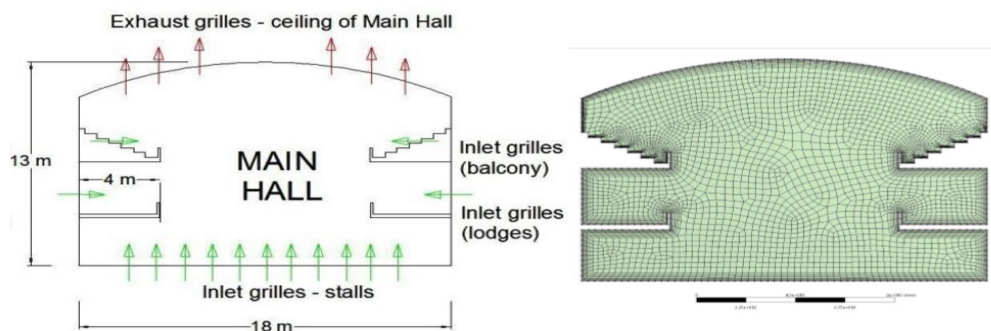


Fig. 1.4- Modellazione della geometria e meshatura della sezione trasversale della sala del teatro di Jassy

Anche in questa analisi per lo studio del comfort interno si ritiene imprescindibile la modellazione della presenza umana, e nuovamente si considera un solo caso di affollamento e cioè la sala al completo.

Focalizzandosi solo sul comfort termico poi i parametri scelti sono: temperatura e velocità dell'aria, umidità relativa, ma questa volta non vengono prese in considerazione le concentrazioni di anidride carbonica che esulano dall'obiettivo dell'analisi.

Questa volta però si procede con una doppia simulazione di un caso estivo e di un caso invernale, tenendo quindi conto delle mutate condizioni esterne, ma anche del diverso impatto della presenza degli spettatori in un caso e nell'altro; viene così sottolineata anche l'importanza del comfort stagionale, che in questo caso porta a concludere che, in taluni casi, anche d'inverno serve un'opera di raffrescamento per compensare l'effetto dell'affollamento degli spettatori.

Può essere ancora utile inserire alcuni parametri che possono ulteriormente dettagliare l'analisi: considerando la pubblicazione di Chin SzeJing del 2018¹⁰ che ha nuovamente l'obiettivo di valutare efficienza dell'impianto HVAC e comfort interno di un auditorium universitario, egli decide di simulare una molteplicità di casi. In primo luogo considera diverse situazioni possibili per quanto riguarda l'affollamento: sala piena, sala occupata a metà con disposizione degli spettatori ordinata, sala occupata a metà con disposizione random (Fig. 1.5 a);

secondariamente si fa variare l'angolo d'inclinazione di immissione dell'aria tra 30°, 45° e 60° e con esso la temperatura di immissione tra 16°C, 24°C e 27°C, al variare di due condizioni di temperatura esterna, uno estivo e uno invernale.

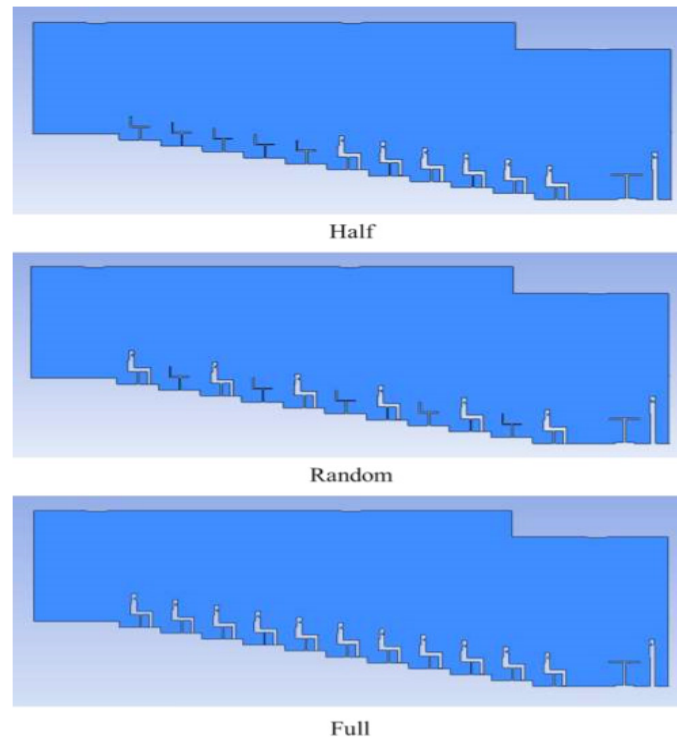


Fig. 1.5 a- Scenari possibili relativi all'affollamento della sala: occupata a metà, disposizione casuale, completa

La simulazione bidimensionale viene eseguita con *Fluent*, e la discretizzazione è variabile a seconda che ci si trovi in prossimità delle bocchette, dove servono informazioni più dettagliate e la maglia assume passo pari a 0.5 cm, o nel resto della sala, dove non è necessario disporre di ulteriori nodi di controllo e le maglie si ampliano fino a raggiungere le dimensioni di 2 cm.

Le grandezze valutate questa volta sono temperatura dell'aria, concentrazione di anidride carbonica, ma soprattutto, come era indicato dal fatto che si facesse variare l'angolo di immissione dell'aria, andamento dei vettori di immissione, si mappa cioè la possibile creazione di vortici d'aria e zone di stagnazione (Fig. 1.5 b).

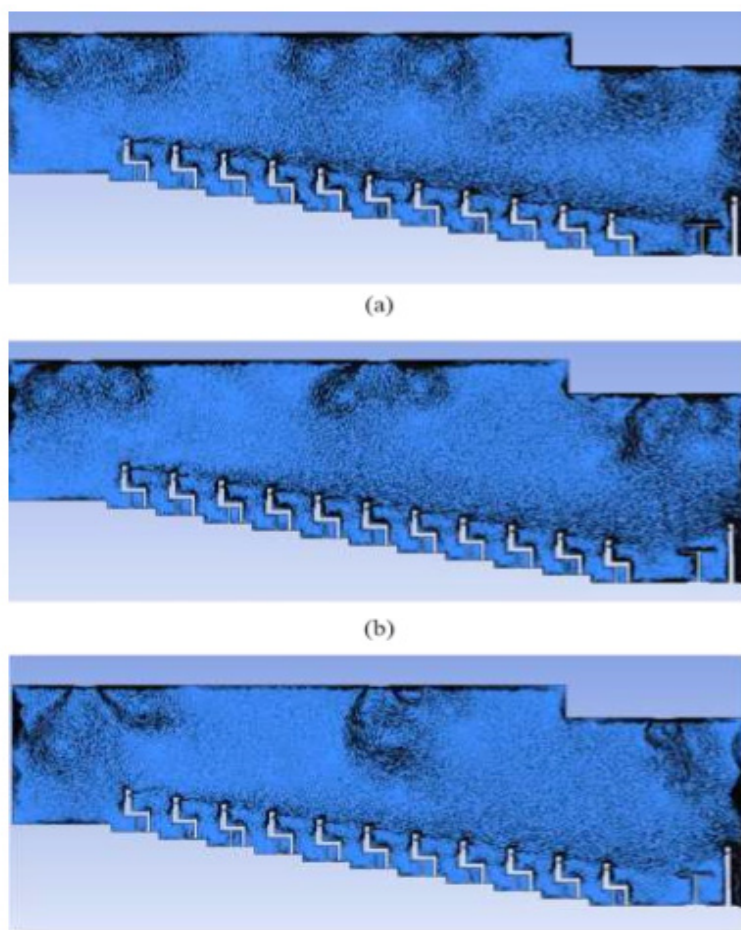


Fig. 1.5 b- Influenza sui flussi d'aria del diverso angolo di immissione del getto, tre scenari possibili: 30°-45- 60°

Spesso però una problematica frequente nel caso del comfort all'interno delle sale teatrali è la presenza di spiacevoli correnti, flussi concentrati d'aria che possono ovviamente disturbare gli spettatori. Proprio riguardo a questa tematica può essere interessante l'articolo di M. Kavacic, D. Mumovic, Z. Stevanovic e A. Young¹¹: essi sono infatti partiti nel condurre la loro analisi CFD da un problema presente nella sala principale del teatro di Belgrado, il fatto cioè che gli spettatori lamentassero un flusso d'aria fredda in raso terra che li colpiva, da seduti, agli arti inferiori.

E' stato dunque realizzato un modello con l'ausilio del software *Flair* (Phoenics) a partire dalla geometria tridimensionale discretizzata in 1.6 milioni di celle secondo l'approccio dei volumi finiti, e dalle condizioni di umidità relativa, temperatura dell'aria e superficiale delle pareti rilevate direttamente all'interno della sala durante gli spettacoli. Successivamente è stata condotta la simulazione e, parallelamente gli spettatori hanno dovuto compilare un questionario sul comfort interno durante gli spettacoli.

Confrontando i risultati si è potuto accertare che le temperatura rientravano all'interno degli standard di legge, ma che il discomfort degli spettatori era dovuto ad un altro fattore: la velocità di immissione superava di poco la massima velocità consigliata ed essendo le bocchette di immissione posizionate ai piedi delle sedute, questo movimento dell'aria faceva percepire

una temperatura minore. La configurazione dell'impianto e le relative velocità imponevano dunque di alzare di qualche grado la temperatura di immissione dell'aria per compensarne gli "effetti collaterali".

Infine Mateus e Carrilho Da Graca¹² presentano un diverso approccio per la simulazione CFD della Gulbenkian Great Hall di Lisbona, svolta anche questa volta con *Phoenix*: per ridurre l'onere relativo al calcolo numerico, invece di eseguire un'analisi 2D, si interviene con la schematizzazione del modello 3D. Si considera cioè la simmetria della sala per poter analizzarne solo metà, si inseriscono dei blocchi rappresentativi delle file di sedute raggruppate a tre a tre ed infine la presenza degli spettatori viene introdotta solo attraverso delle sorgenti di calore e umidità relativa.

Capitolo 1 | Riferimenti note

¹ <https://www.teknoing.com/guide/guide-ingegneria/fluidodinamica-computazionale-cfd-applicazioni-comuni-e-software/>

² <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/545846>

³ <http://people.dm.unipi.it/acquistp/daini.pdf>

⁴ Tu J., Yeoh G.H., Liu C., 2008, *Computational Fluid Dynamics, a practical approach*, Elsevier

⁵ Date A.W., 2005, *Introduction to computational Fluid Dynamics*, Cambridge University Press

⁶ https://moodle2.units.it/pluginfile.php/185767/mod_resource/content/1/Turbolenza.pdf

⁷ <https://amslaurea.unibo.it/9588/>

⁸ El-Hariry G., Khalil E.E., Abdel-Samee W., 2008, *Numerical investigations of thermal comfort and indoor air quality inside air conditioned amphitheatre*, *Indoor Air 2008, 17-22 August 2008, Copenhagen, Denmark*

⁹ Hudisteanu V., Popovici C.G., 2015, *Comparative Analysis of HVAC system functionality in "Vasile Alecsandri" National Theatre of Jassy*

¹⁰ Jing C.S., 2018, *Numerical investigation of indoor environmental quality and ventilation performance in a university lecture theatre*

¹¹ Kavgic M., Mumovic D., Stevanovic Z., Young A., 2007, *Analysis of thermal comfort and indoor air quality in a mechanical ventilated theatre*, *Energy and Buildings 40*

¹² Mateus N., Carrilho Da Graca G., 2014, *Thermal and airflow simulation of the Gulbenkian Great Hall*, *13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28*

Capitolo 1 | Fonti immagini

- Fig. 1.1: <https://i.ytimg.com/vi/93hxZuIA75I/maxresdefault.jpg>
- Fig. 1.2: <https://cf.ppt-online.org/files/slide/a/a9kIT4szgqm3unBEJDeFy68XYvLU-7RoZN0cKd5/slide-34.jpg>
- Fig. 1.3 a-1.3 b: *Numerical investigations of thermal comfort and indoor air quality inside airconditioned amphitheatre*, Gamal El-Hariry, Essam E. Khalil, Waleed Abdel-Samee, 2008
- Fig. 1.4: *Comparative Analysis of HVAC system functionality in “Vasile Alecsandri” National Theatre of Jassy*, Valeriu Hudisteanu, Catalin George Popovici, 2015
- Fig. 1.5 a-1.5 b: *Numerical investigation of indoor environmental quality and ventilation performance in a university lecture theatre*, Chin SzeJing, 2018

2. Il Teatro Carlo Felice

2.1 Storia del teatro

Durante il Settecento la città di Genova possiede una solida tradizione teatrale, sviluppando un'intensa attività musicale. I teatri dell'epoca, come il Falcone e il Sant'Agostino, non sono aperti a tutta la popolazione, ma vengono frequentati esclusivamente da nobili e aristocratici.

Verso la fine del XVIII secolo, si percepisce l'esigenza di dotare la città di un grande teatro che si imponga nel tessuto cittadino come organismo edilizio articolato e autonomo. Nato come luogo di raccolta in grado di rappresentare la misura culturale di Genova, esso avrebbe avuto un ruolo essenziale per la popolazione genovese, agendo da centro promotore e trasmettendo i nuovi ideali della Rivoluzione francese. Infatti, l'annessione spontanea genovese all'Impero francese provoca importanti ripercussioni non solo nel tessuto politico ed economico, ma anche in quello culturale e teatrale.

Il Carlo Felice viene realizzato nel cuore della città di Genova, in piazza San Domenico, ossia l'attuale piazza De Ferrari, sulle rovine di un antico convento demolito definitivamente nel 1821. Collocato presso il contrafforte che da Piccapietra volge a Sant'Andrea per elevarsi nella collina di Sarzano, il teatro acquisisce un elevato significato quale cerniera tra la città medievale e la nuova città che ben presto va formandosi verso levante.



Fig. 2.1- Antica stampa con veduta della chiesa del convento di San Domenico

Il 31 gennaio 1825 l'architetto e urbanista italiano Carlo Barabino presenta un primo progetto per la costruzione di un nuovo teatro. Egli non è nuovo agli studi dell'architettura teatrale, infatti, proprio con un progetto per un teatro durante un concorso romano esordisce nel 1789 vincendo il primo premio *ex aequo* all'Accademia di San Luca, dove aveva come maestro un grande esperto teatrale, Giuseppe Barberi. Questo progetto viene considerato dalla commissione assai esauritivo, dal momento che concepisce per la sala teatrale un impianto ovato e in alzato non più i tipici palchetti indipendenti di matrice barocca, bensì logge a balconate

continue.

Quando nel 1825 un Barabino più maturo e consapevole viene chiamato a fornire i progetti per il teatro di Genova, egli adotta un maggior impegno rispetto ai concorsi romani, pur utilizzando le medesime linee guida dell'epoca.

Il teatro del Barabino è legato ad un momento di eccezionale trasformazione di Genova, di abbellimento della stessa. Esso rappresenta un simbolo per la popolazione non solo architettonico, ma anche culturale. La sua realizzazione non riguarda un'iniziativa privata degli azionisti proprietari dei palchi, bensì un'azione governativa, favorita dai Sindaci e realizzata, seppure con il contributo dei palchisti, per conto della città. Ciò significa che la costruzione del nuovo Carlo Felice trascende i singoli progettisti e amministratori per investire tutti i cittadini, rispondendo alla coscienza e al sentimento popolare.

L'architetto Carlo Barabino si trova a doversi interfacciare con un progetto nato da un efficace confronto con le più aggiornate e più vive ricerche progettuali condotte al momento a livello internazionale. Egli, possedendo la fama di aver disegnato e realizzato la Genova dell'Ottocento, tra cui la sistemazione del parco dell'Acquasola, la costruzione del Palazzo dell'Accademia e la progettazione del Cimitero di Staglieno, è chiamato a risolvere con la sua opera e con la sua ispirazione urbanistica i problemi di una città che si va drasticamente trasformando.

Dal suo progetto per il nuovo teatro genovese emerge la razionalità della composizione e la chiarezza distributiva. Dovendo sorgere in un sito piuttosto irregolare, inizialmente si procede all'acquisizione e alla demolizione di edifici esistenti. Il primo progetto mostra varie incertezze sia esternamente che internamente, come il portico colonnato e il pronao centrale che paiono distaccati dall'organismo edilizio complessivo, costituendo più un fondale scenico alla piazza. L'impostazione della pianta è decisamente assiale, ma proprio per questo sviluppo l'ingresso dal grande pronao sulla piazza viene considerato secondario.

Per la sala principale egli ipotizza una struttura a cavea, priva cioè degli ordini di palchi che durante il Settecento avevano una chiara funzione discriminante. Viene così eliminata per la prima volta nella storia la diversificazione delle fasce sociali all'interno del teatro. Inizialmente sceglie per il teatro Carlo Felice una sala a forma ellittica sul modello di quella del Regio di Torino. Successivamente adotta una conformazione a "ferro di cavallo" tipica dei teatri all'italiana come Piermarini aveva optato per il Teatro alla Scala di Milano.

Questa tipologia strutturale si diffonde tra il XVIII e il XIX secolo e permette di ricavare un nuovo spazio, chiamato platea, spesso utilizzato per il ballo. Eliminando le gradinate, si favorisce la costruzione di palchi separati tra loro e divisi in altezza e ordine. Inoltre, ottenendo una maggiore profondità della scena, è possibile utilizzare quinte innovative e tecnologiche.

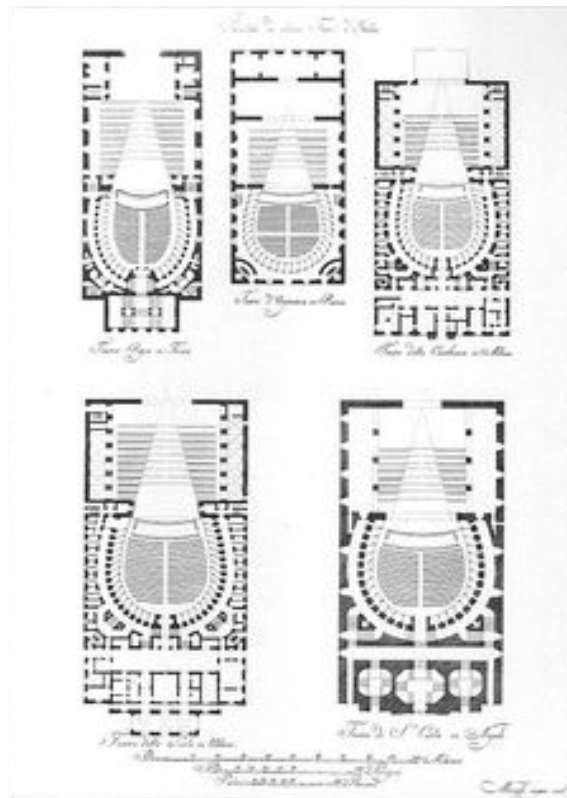


Fig. 2.2- Parallelo d'alcuni teatri d'Italia. Teatro Regio di Torino, Teatro Argentina di Roma, Teatro della Canobiana in Milano, Teatro della scala in Milano, Teatro di S. Carlo in Napoli di D. Mercoli

Si ha una documentazione grafica di quattro successivi progetti del Barabino, in cui concepisce inizialmente un impianto distributivo più incerto fino ad approdare ad una pianta funzionale nella quale si evidenzia un asse di composizione esterno ortogonale a quello interno, interagendo così efficacemente con l'ambiente urbano circostante. Quindi all'ortogonalità degli assi viene fatta corrispondere la duplice funzionalità degli ingressi in base a questioni sociali ed urbanistiche, infatti l'accesso di Sua Maestà viene effettuato dal magnifico pronao.

Per un certo periodo Barabino collabora con l'architetto Luigi Canonica, convocato per la sua vasta esperienza dal momento che in passato ha diretto i lavori di pressoché tutti i più rinomati edifici teatrali. Del Canonica vengono attuati i suggerimenti tecnici per la curva della platea. Inoltre, egli riconosce il fatto che il luogo sia particolarmente infelice, dal momento che si è impossibilitati a realizzare l'entrata principale del teatro verso piazza San Domenico e, per questo, loda la soluzione dei portici e la distribuzione degli ingressi. L'orografia territoriale genovese costituisce un enorme vincolo anche per un così disinvolto progetto di sostituzione.

La documentazione a riguardo risulta comunque parecchio scarsa e gli studi più recenti hanno ridimensionato l'operato e l'influenza sul progetto del Canonica. Ben presto i rapporti tra i due si interrompono e il 22 dicembre 1825 la Direzione dei Teatri approva definitivamente il progetto del solo Barabino.

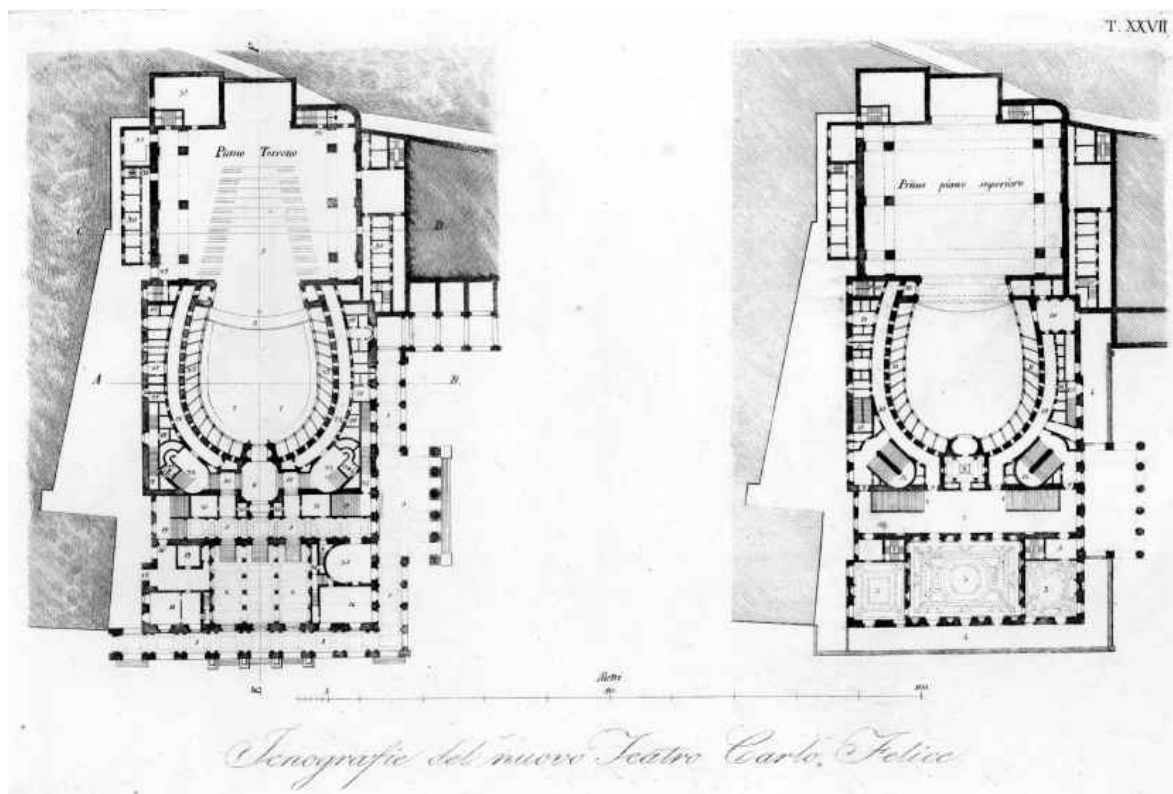


Fig. 2.3 - Pianterreno e primo ordine di palchi del nuovo teatro di Genova, e Piano dell'Ordine della Corona e del Ridotto di Carlo Barabino

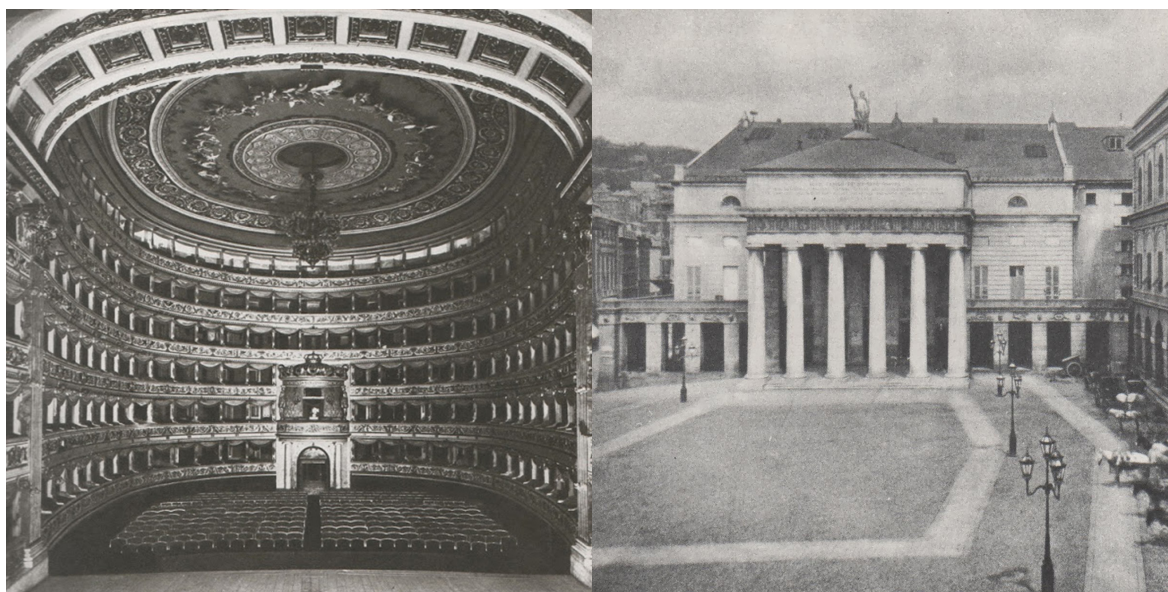
L'appaltatrice della fabbrica è la ditta Felice Noli di Torino e i lavori cominciano quindici giorni dopo. In seguito a una serie di modifiche progettuali ad opera del Barabino, nell'aprile del '27 viene avviata la costruzione del palcoscenico e nel maggio l'architetto completa i disegni del palco reale. L'inaugurazione del teatro avviene il 7 aprile 1828 con la prima di *Bianca e Fernando* di Vincenzo Bellini alla presenza del re Carlo Felice e della sua consorte.

Esternamente il teatro di matrice neoclassica viene ammirato per la solidità della costruzione e al tempo stesso per la bellezza delle sue forme nobili. Infatti assume una conformazione piuttosto particolare per l'epoca. Con lo scopo di ottenere un doppio affaccio dell'edificio in via Roma e sulla futura piazza De Ferrari, il Barabino realizza un'angolatura di 90° nei prospetti principali e non opta per una consueta estensione longitudinale dei corpi che lo compongono.

Assumendo una sagoma piuttosto tozza, esso occupa una superficie di 4000 mq, con una lunghezza massima di 94 m e una larghezza (porticati compresi) di 47 m. La facciata a sud del teatro, lunga 48 m, è caratterizzata da un colonnato di marmo in stile dorico. La scelta stilistica in tal senso richiama un ritorno alla severità e alla purezza degli architetti della rivoluzione che hanno prediletto l'astratta bellezza del volume geometrico.

Internamente il teatro racchiude un'ampia sala con un diametro di 18,50 m, una lunghezza sino alla bocca d'opera di 20 m e un'altezza di 17 m, considerata una delle migliori del tempo per la risposta acustica. Attorno ad essa si sviluppano cinque ordini di palchi e alla sommità il loggione. Il palcoscenico è profondo 38 m e largo da 22,5 a 32 m. La notevole altezza, 37 m, consente l'innalzamento dei sipari senza la necessità di piegarli. Nella sua

totalità il teatro è in grado di ospitare 2500 spettatori.



Figg. 2.4-2.5 - Fotografia interna al teatro raffigurante la platea e il palcoscenico e a destra veduta del pronao del teatro Carlo felice con le antiche case della piazza San Domenico

Le impressioni fatte dal nuovo teatro sui genovesi sono per la maggior parte positive, mentre i critici neoclassici seguono filoni di pensiero opposti. Per alcuni il fabbricato risulta essere “nobile”, “puro” e “semplice”, mentre per altri è “privo di leggerezza e di eleganza”.

Indipendentemente dal suo valore architettonico la fortuna del teatro è immediata, tanto da poter essere ritenuto una delle migliori architetture teatrali dell’epoca in Italia. Il teatro barabbiniano, negli anni di maggior splendore, richiama un pubblico attratto da luci, colori, dalle magnifiche decorazioni e assolve il ruolo di locale di rappresentanza genovese. All’interno di tale “club” vi si intrecciano rapporti di ogni genere, si incontrano amici, persone di rilievo e ciò perdura per buona parte del XIX secolo. La sua decadenza inizia ad affermarsi con il sorgere di nuove forme di spettacolo maggiormente stimolanti, come cinema, varietà e caffè, a neppure cento anni dalla sua inaugurazione.

Nel corso degli anni il Carlo Felice subisce una serie di restauri e ammodernamenti. I più significativi dal punto di vista strutturale consistono nel passaggio dall’utilizzo di travi lignee a quelle in cemento armato. Inoltre viene ampliata la buca orchestrale e al di sotto del palcoscenico viene sistemata una cabina elettrica moderna utilizzabile per le scene. Nel 1853 si adotta l’illuminazione mentre nel 1892, in occasione delle Colombiane, il teatro viene dotato di corrente elettrica. Circa un ventennio dopo, nel 1912, viene installato un sipario metallico comandato da un argano idraulico.

Contemporaneamente, nello scenario internazionale, va a delinearsi un nuovo schema costruttivo teatrale, dettato da esigenze tecnico-progettuali e da nuovi principi ideologici. Nel 1876 con la costruzione della Festspielhaus a Bayreuth voluta dal musicista Wagner su progetto dell’architetto tedesco C. Brandt cessa il dominio della sala teatrale cosiddetta “all’italiana”.

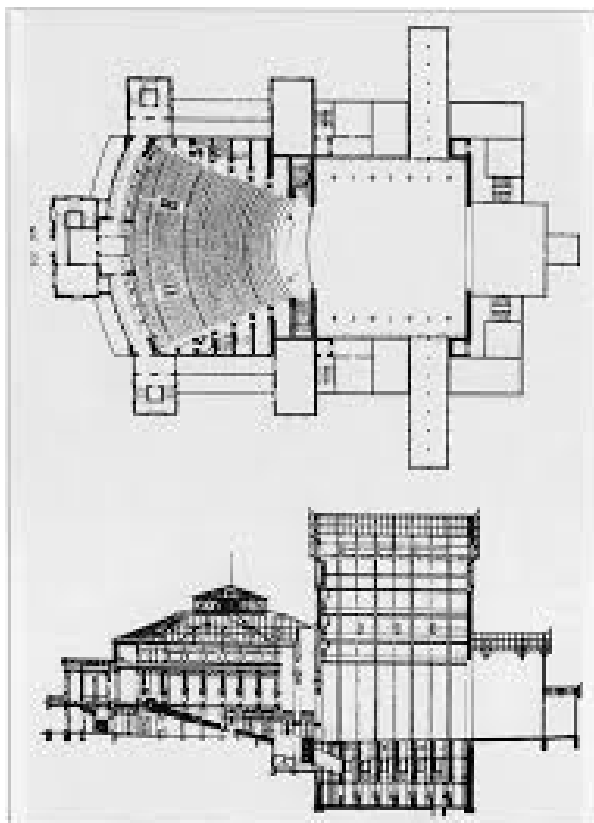


Fig. 2.6 - Pianta e sezione longitudinale del Festspielhaus a Bayreuth di C. Brandt, 1876

Le ragioni di tale abbandono sono prettamente funzionali, infatti si sancisce che ciascun posto della sala debba avere necessariamente una vista completa dell'intero palcoscenico senza interferenze di persone o elementi architettonici. A seguito di studi ingegneristici, per ottenere una massima visibilità, vengono eliminati tutti i posti a sedere al di fuori o al di sopra di un angolo di visibilità di circa 30°. Anche l'orchestra costituisce un intralcio visivo, per questo motivo scompare in una fossa a gradinate. La sala teatrale va a conformarsi sempre più al teatro classico, assumendo una conformazione a ventaglio.

Con l'avvento della seconda guerra mondiale Genova viene privata di tutti i suoi teatri. I bombardamenti aerei colpiscono la maggior parte del patrimonio culturale genovese tra cui Palazzo Reale, Palazzo Spinola, Palazzo Tursi, Palazzo Ducale e molti altri edifici. Il Carlo Felice non viene distrutto integralmente e nell'arco di pochi mesi vengono avviati i lavori per porlo in condizioni di riprendere l'attività.

Nel corso degli anni una programmazione di elevata qualità continua a proporre, nonostante tutto, prime assolute, inizialmente nel vecchio teatro bombardato e dal 1963 presso il Politeama Margherita. Vengono organizzati appuntamenti di rilievo e presentati grandi artisti fra cui Maria Callas, Renata Tebaldi e Mario Del Monaco. Successivamente, nel mese di agosto, il teatro viene fatalmente bombardato subendo danni irreparabili che comportano la perdita dell'intera struttura lignea.



Fig. 2.7 - Il ridotto del teatro dopo i bombardamenti

Al termine della guerra vengono indetti una serie di bandi di concorso internazionali di idee per la ricostruzione del teatro ai quali partecipano architetti emergenti in quel periodo storico, quali Mario Labò e Luigi Carlo Daneri. Tuttavia, nel 1951 viene dichiarato vincitore Paolo Antonio Chessa.

Nel suo progetto si avverte una forte capacità di articolare le varie parti dell'edificio come membra di uno stesso organismo. Infatti, l'asse del pronao diventa la via di flusso principale pedonale che trova nel teatro non più uno sbarramento, ma una via di collegamento tra piazza De Ferrari, la galleria Mazzini e il futuro centro di Piccapietra. Meno efficace però sono le proporzioni dimensionali tra il monumento esistente e il prisma ospitante le strutture sceniche costruito sopra il palco, esageratamente mastodontico.

Il suo progetto, del quale si hanno scarse documentazioni, prevede la realizzazione di un teatro frutto di una fusione tra passato e presente, antico e moderno, attraverso bruschi accostamenti. Tra le sue idee innovative comunque emergono la realizzazione di una sala sotterranea e addirittura la presenza di un albergo di circa sessanta camere.

A malincuore il progetto Chessa incontra molteplici incomprensioni e durante gli anni Sessanta, a seguito di una causa tra l'architetto e il Comune di Genova, viene accantonato definitivamente. Nel marzo del 1961 si forma la prima giunta di centrosinistra e in un clima di rinnovate volontà politiche si decide di riprendere subito il tema del Carlo Felice. Ai fini di evitare il prolungarsi delle passate polemiche, si pensa ad un nuovo progettista.

Nel 1963 il Comune affida la redazione di un nuovo progetto all'architetto Carlo Scarpa. Questa decisione risulta essere importante e oculata essendo Scarpa uno dei migliori architetti italiani, non solo per l'alta qualità formale dell'artista, ma per la sua profonda coscienza

dell'importanza del luogo in cui opera. Oltre al Carlo Felice un progetto significativo per l'architetto è il Teatro Comunale di Vicenza, nonostante entrambe non siano mai giunti alla realizzazione.

Nel cantiere genovese viene affiancato da Luigi Croce nella parte strutturale e da Zavellani Rossi nella parte impiantistico-teatrale. Inoltre, nella medesima circostanza l'ingegnere Gianfelice Bertolini viene incaricato di progettare i relativi impianti di condizionamento e di riscaldamento.

Scarpa decide di conservare l'esterno barabiniano nelle tre diverse proposte progettuali che presenta, nella logica di operare un restauro conservativo e di favorire il partito politico del "com'era, dov'era". Infatti ormai nessun progettista è più disposto ad alterare o distruggere o addirittura non ricostruire gli edifici storici, il futuro della città è qualcosa di più complesso della possibilità di avere qualche nuovo edificio "moderno" nel centro storico.

nonostante l'arduo incarico, egli opta per il mantenimento della parte neoclassica, decidendo di progettare una cavea interna e di potenziare il volume della torre scenica. Per gli interni Scarpa ipotizza nella platea una soluzione formale a conchiglia mediante due ferri di cavallo sovrapposti e sfalsati in modo da riprendere la struttura classica del teatro. Eliminando i palchi Scarpa restituisce alla cavea la funzione antica indirizzata esclusivamente verso lo spettacolo.

Nella soluzione finale, ma anche nei progetti precedenti, la cavea si configura come uno spazio dotato di forte unità benché suddiviso in due distinti settori circolari giustapposti. Infatti, nelle innumerevoli variazioni riscontrabili osservando la totalità dei disegni per la platea emerge quale motivo dominante per tutta la ricerca progettuale la tendenza a considerare sempre la sala principale come un grande vano unitario.

Gli anni '70 sono caratterizzati da un susseguirsi di diatribe e da svariate modifiche progettuali volute dal Comune di Genova. La richiesta di inserire un secondo teatro per la prosa all'interno comporta la stesura di un nuovo progetto nel 1973. La compresenza di due teatri, di cui uno sotterraneo, in uno stesso edificio impone misure di sicurezza complesse da realizzare.

L'architetto inoltre nelle diverse versioni ricerca sempre faticosamente una sintesi tra le dimensioni del teatro barabiniano e quelle del nuovo intervento. Il volume edilizio complessivo viene smembrato in due segmenti principali, la sala che si relaziona alla scala del teatro ottocentesco e la torre scenica. Tuttavia le facciate delle parti nuove si saldano nelle antiche senza mutare il carattere puristico della costruzione del Barabino.

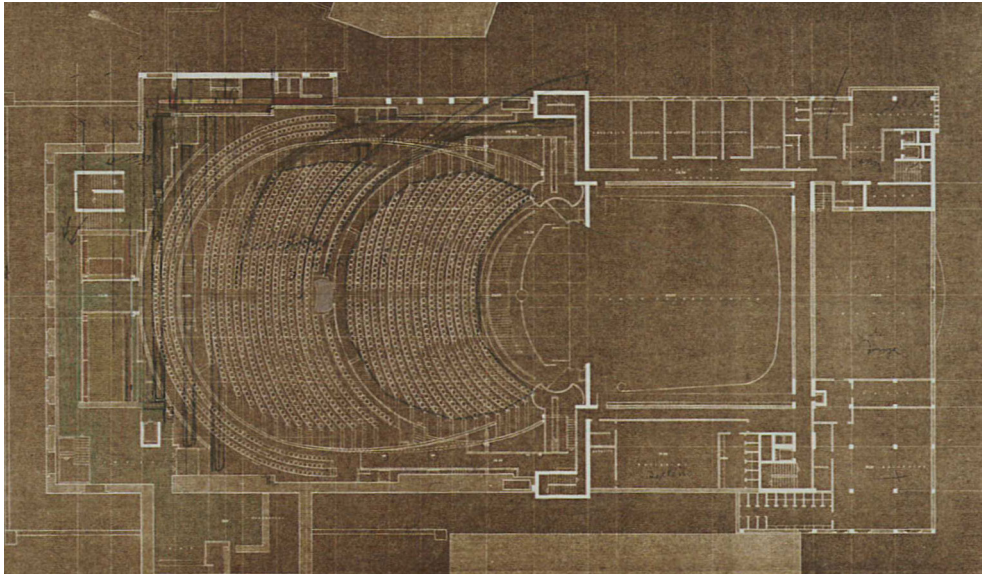


Fig. 2.8- Primo progetto di massima consegnato al Comune di Genova di Carlo Scarpa, pianta a quota +36,40, grafite e matite colorate su copia eliografica, 1964-1965.

Nel 1977 si ha la definitiva versione del nuovo teatro che poco ricorda le idee iniziali concepite da Scarpa. Viene riproposta inalterata la sala dell'opera, si inserisce il teatro di prosa richiesto e viene posto un volume sul palcoscenico in dimensione tale da stravolgere l'equilibrio raggiunto nelle sperimentazioni precedenti di Scarpa.

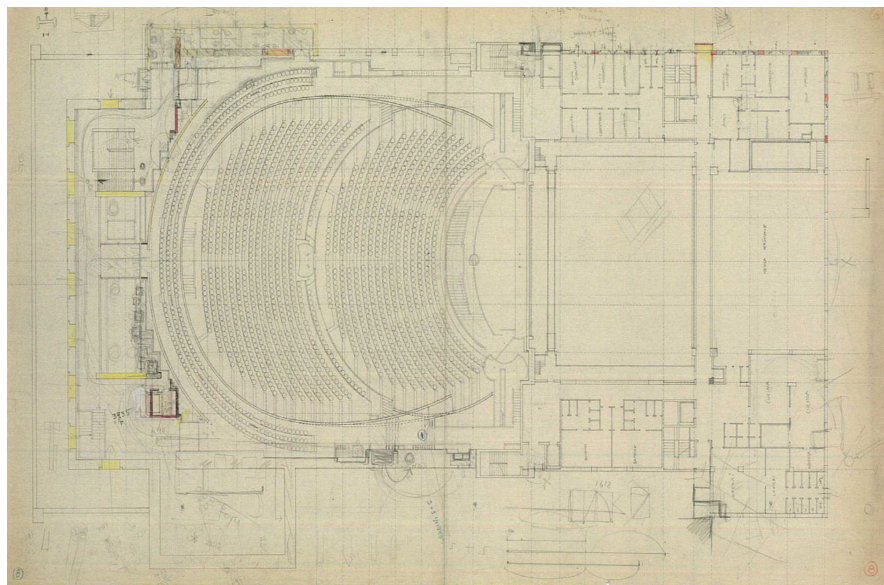


Fig. 2.9 - Secondo progetto di Carlo Scarpa, pianta della sala grande a quota +39,35 a livello del loggione, grafite e matite colorate su copia eliografica, 1967-1970

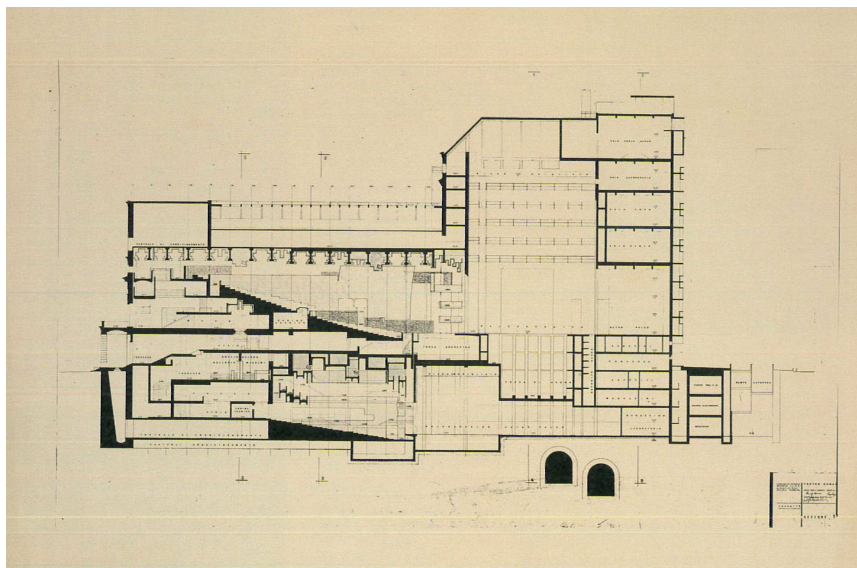


Fig. 2.10 - Variante al secondo progetto di Carlo Scarpa, sezione longitudinale, copia eliografica su cartoncino, 1973-1977

L'anno seguente l'architetto muore improvvisamente a Tokyo e nel febbraio 1981 si indice un appalto-concorso per la realizzazione del teatro. Si tratta di un concorso già tutto proiettato verso l'esecuzione e perciò riservato a consorzi di imprese, affinché sia possibile valutare contributi completi sui diversi piani dell'architettura, delle tecnologie di scena, delle soluzioni strutturali e degli oneri finanziari.

Viene dichiarato vincitore il gruppo di imprese facente capo alla Mario Valle S.p.A. di Arenzano. Firmatari del progetto esecutivo sono gli architetti Ignazio Gardella, Aldo Rossi e Angelo Sibilla. Fra i consulenti partecipano Ezio Frigerio (scenografo) e José Bernhart (acustica).

Il teatro, come edificio e come concezione dello spazio, ha un significato del tutto particolare nel lavoro e nella vita di Aldo Rossi. L'architetto non è neofita di studi teatrali quando trova a doversi occupare del Carlo Felice. Dal Teatro Paganini a Parma (1964), al Teatro Carlo Felice di Genova (1989), si passa per il Teatrino scientifico (1978) e il Teatro del Mondo Venezia (1979), arrivando fino al progetto di ricostruzione del Gran Teatro la Fenice per la città lagunare. Egli concepisce questo spazio come un vero e proprio monumento e durante la sua progettazione non tiene eccessivamente conto dell'aspetto funzionale. Rossi tende ad attuare una mera semplificazione formale rinunciando ad ogni complessità, per privilegiare pochi elementi giungendo ad una sorta di ridondanza della semplicità.

I lavori di costruzione iniziano il 7 aprile 1987, centocinquantanove anni dall'inaugurazione del Barabino. Essi terminano poi nell'aprile del 1990 e il teatro viene presentato alla stampa il 18 aprile 1990. La volontà di ricostruzione dell'esterno del teatro del Barabino è il punto di partenza per questo nuovo progetto e viene considerato come un punto di forza.

Esternamente vengono adottate scelte progettuali già ipotizzate da Chessa e Scarpa, come la realizzazione di una piazza coperta di 400 mq di superficie che colleghi Galleria Mazzini a piazza De Ferrari. In particolar modo del progetto Scarpa vengono riprese tre soluzioni: il mantenimento della parte neoclassica, la progettazione della cavea interna e il nuovo volume

della torre scenica.

Con lo scopo di dotare il teatro delle più avanzate tecnologie, gli architetti decidono di svilupparlo in altezza, realizzando l'imponente torre scenica alta circa 63 m, un parallelepipedo liscio e compatto, ornato con un semplice cornicione. Essa viene distinta in due fasce: una inferiore con rivestimento in intonaco bugnato che segna il volume della macchina scenica all'interno e corrisponde all'altezza della torre della fabbrica del Barabino, mentre quella superiore con intonaco liscio marca il volume degli spazi di servizio. La distribuzione verticale della torre viene garantita da quattro corpi scala con ascensore posti agli angoli della stessa.

Tale torre rappresenta una grande fabbrica di produzione che costituisce un punto di riferimento nel mezzo della città e la semplicità della sua costruzione ricorda proprio quella di una fabbrica, al cui interno vengono prodotte le scene teatrali. Questa scelta progettuale diventa un punto di riferimento di Genova, come le torri romaniche e gotiche europee, le cattedrali e i grattacieli di New York. Ad essa si affianca un corpo più basso e massiccio ospitante la platea, i foyers e i servizi per il pubblico.

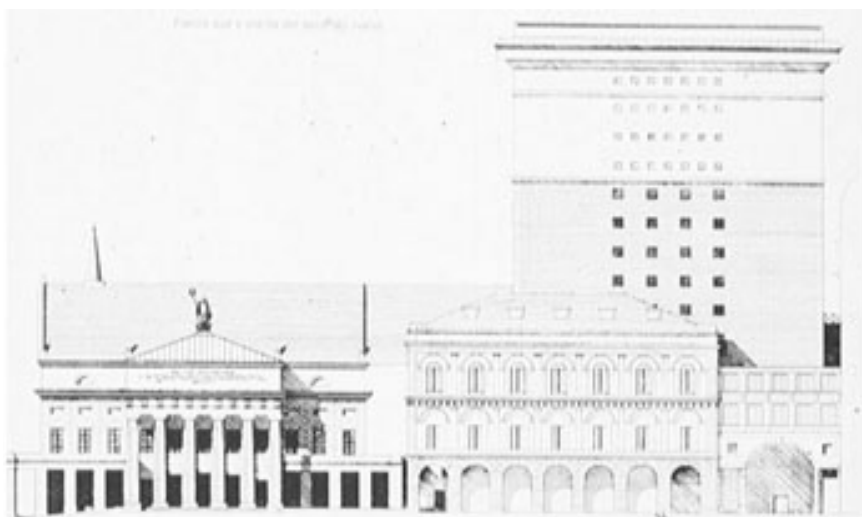


Fig. 2.11 -Prospetto su Piazza De Ferrari di Ignazio Gardella, Fabio Reinhart, Aldo Rossi, Angelo Sibilla

Internamente, dall'ingresso del teatro, scendendo una scalinata si accede in una sala adibita allo svolgimento di convegni, conferenze e incontri musicali. Essa ospita di 200 posti, è provvista di un piccolo palcoscenico e risulta essere indipendente dal resto del teatro. I foyers sono tutti disposti in verticale uno sopra l'altro. Da essi si raggiunge direttamente la sala principale a cavea, composta da una serie di gradoni discendenti verso il palcoscenico.

Questa cavea, in passato già concepita da Scarpa, risulta essere una soluzione necessaria per un moderno teatro e sarebbe stata disegnata in tal modo da qualsiasi buon architetto. Le pareti di quest'area sono come interni/esterni della città, simili alle case che si affacciano sulla piazza, parti di un insieme il cui centro è pur sempre la scena e lo spettacolo. Sui gradoni sono sistemate le file di poltrone rosse alle quali è collegato il sistema di condizionamento dell'aria mediante diffusori a piede di poltrona.

Le tre versioni del progetto, elaborate per le due fasi del concorso e per la realizzazione, presentano leggere modifiche. Le principali differenze sono relative alla composizione delle pareti laterali e del boccascena della sala principale del teatro, e ad una nuova distribuzione degli spazi sotterranei di prova e di servizio.

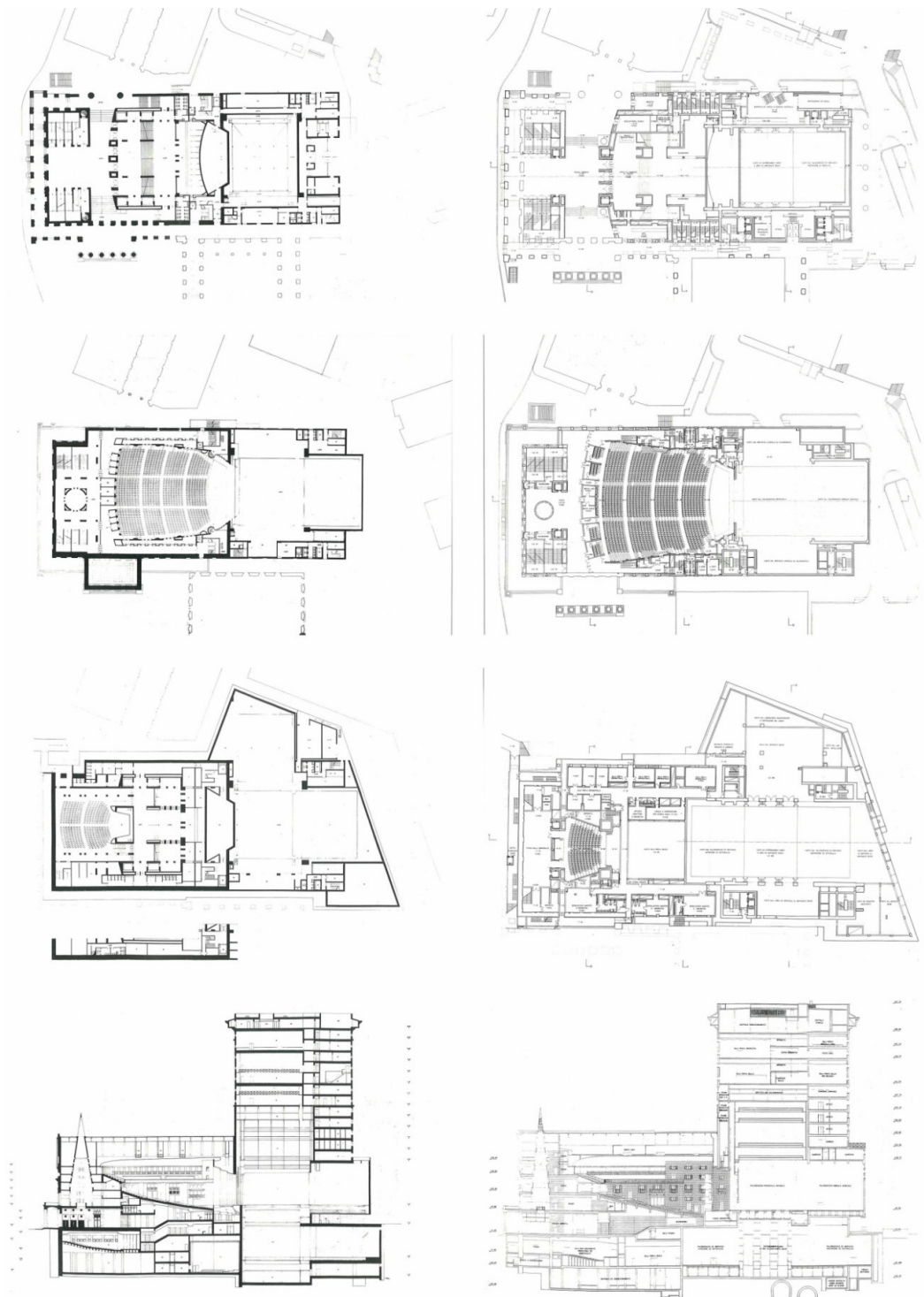


Fig. 2.12-2.13 - Confronto tra i progetti per la fase di qualificazione del gennaio 1982 (colonna a sinistra) e i progetti definitivi del febbraio 1990 (colonna a destra) rispettivamente raffiguranti la pianta dell'ingresso e della piazza coperta, la pianta della sala e del palcoscenico, la pianta della sala concerti e dei palcoscenici di sottopalco ed infine la sezione longitudinale di Ignazio Gardella, Fabio Reinhart, Aldo Rossi, Angelo Sibilla

Platea e galleria (balconata e loggione) possiedono una superficie di circa 1600 mq. I posti a sedere sono così ripartiti: 1399 in platea, 504 in galleria, 76 nei palchi e 21 nei balconi. La distanza massima tra il boccascena e l'ultima fila di poltrone è di 44 m. La platea e il palcoscenico sono separati da un sipario tagliafuoco, ampio 200 mq e articolato in centoventicinque pannelli.

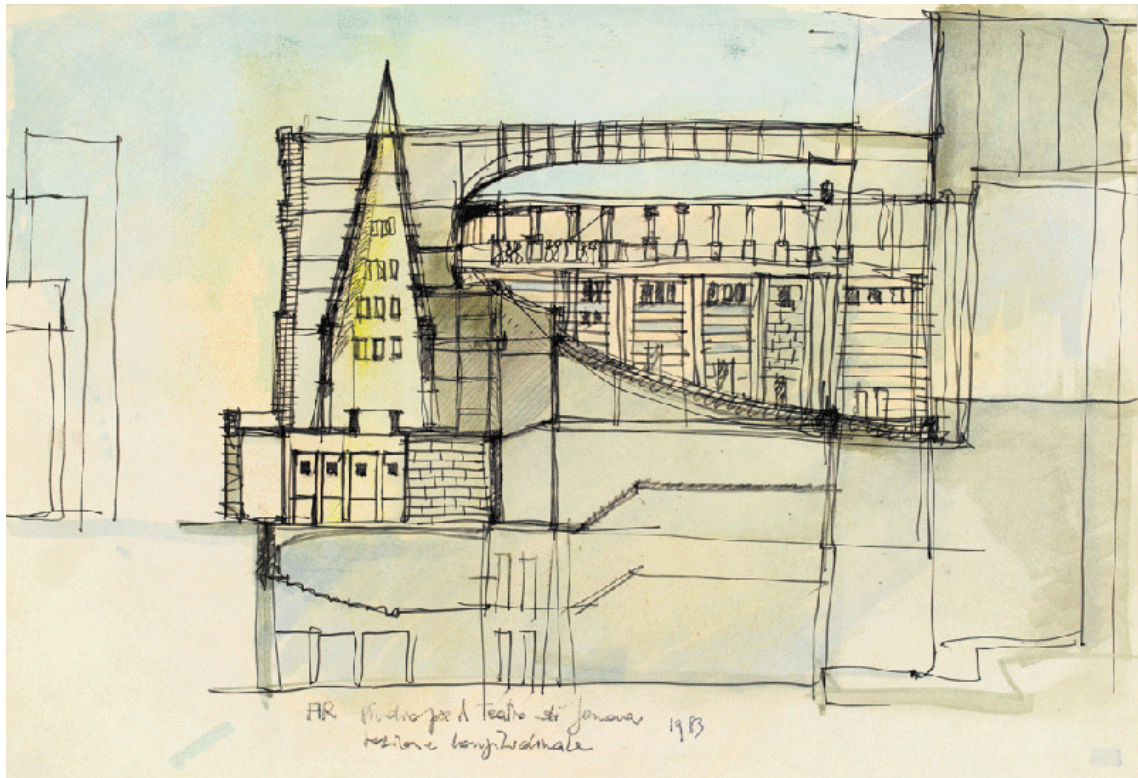


Fig. 2.14 - Sezione longitudinale della sala e foyer di Ignazio Gardella, Fabio Reinhart, Aldo Rossi, Angelo Sibilla

Dal punto di vista del settore tecnico il teatro Carlo Felice appare assai moderno e all'avanguardia. E' dotato di quattro palcoscenici: quello principale, uno dorsale, alle spalle del primo, due inferiori, tra loro affiancati. Il palcoscenico principale ha una superficie di 574 mq. Esso è munito di un piano mobile modulato a scacchiera con 25 elementi innalzabili singolarmente per 3 metri e con possibilità di inclinazione in ogni direzione.

Nel sottopalco si trovano gli spazi per il deposito di elementi scenici e per le funzioni di montaggio e smontaggio. L'innovativa struttura tecnologica del Carlo Felice consente di sostituire una scena a sipario aperto nel giro di pochi minuti. La fossa orchestrale di forma trapezoidale possiede una superficie di 120 mq. La torre scenica alta 63 m e avente base quadrata 40x40 m accoglie quattro sale prove destinate all'orchestra, al coro, al corpo di ballo e alla regia.

Riassumendo, nella seguente tabella si trovano i dati tecnici utili per le successive analisi:

Volume totale	mc	230000
Volume scene e servizi di scena	mc	118000
Volume sala e zone collegate	mc	106000
Volume fuori terra	mc	151000
Volume interrato	mc	79000
Superficie palcoscenico principale	mq	574
Superficie palcoscenico dorsale	mq	368
Superficie totale sottopalco	mq	1760
Distanza massima boccascena spettatori	m	44
Dimensione boccascena	m	10x16
Dimensioni poltrone	cm	55x73
Interasse poltrone	cm	85
Mc. sala utile/spettatore	mc/spettatore	8.75
Posti sala principale	n.	2000
Posti sala conferenza	n.	206
Camerini	n.	18

2.2 Impianto di climatizzazione: la distribuzione dell'aria

Il sistema di diffusione dell'aria di una sala di spettacolo, quale teatro, auditorio o cinema, deve garantire una distribuzione uniforme senza correnti e senza zone di ristagno. Attualmente le tipologie di distribuzione dell'aria normalmente adottate per sale di dimensioni medio-grandi sono:

- mandata dall'alto con ripresa dal basso;
- mandata a parete con ripresa dal basso;
- mandata dal basso con ripresa dall'alto.

La prima soluzione viene utilizzata più frequentemente in spazi aventi altezze non elevate per non incorrere nel fenomeno della stratificazione che rischierebbe di provocare una caduta d'aria fredda sugli spettatori. Questo meccanismo prevede che una parte di aria debba comunque essere ripresa dall'alto in modo da evitare la presenza di sacche d'aria calda stagnante che provocherebbero un effetto radiante sgradevole per gli spettatori.

Sempre in termini svantaggiosi si ha che il flusso d'aria immessa presenta un andamento contrario al moto convettivo d'aria calda prodotto dalle persone. Infatti, ciascun spettatore produce una portata d'aria di circa 35 L/s a cui corrisponde un flusso verso l'alto con velocità intorno a 0,14-0,17 m/s all'altezza della persona. Lo scontro di queste due masse d'aria di notevole entità può provocare instabilità e disomogeneità nella distribuzione dell'aria fredda.

La distribuzione d'aria che prevede una mandata a parete con ripresa dal basso è caratterizzata da costo contenuto e una maggior facilità di installazione rispetto ad altri terminali. Tuttavia il design delle bocchette a parete costituite da ugelli a lunga gittata oggi giorno viene

rifiutato dagli architetti negli ambienti teatrali e museali di prestigio. Inoltre, dal momento che l'aria fuoriesce dagli ugelli a velocità notevolmente elevate, per evitare di provocare disturbo agli spettatori devono essere posizionati ad un'altezza minima sopra le poltrone compresa tra 2,3 e 3,5 m.

All'interno del teatro Carlo Felice viene adottata parzialmente la terza soluzione e la progettazione è ad opera dello studio Amman Progetti. Questa tipologia risulta essere inizialmente più svantaggiosa economicamente, ma presenta numerosi vantaggi rispetto alla mandata dall'alto oppure a parete.

Gran parte del movimento d'aria avviene per convezione naturale in quanto il flusso segue il gradiente naturale della sala. Tuttavia, nel teatro genovese, la ripresa dell'aria atta a compiere un lavaggio dell'ambiente non viene effettuata nella parte alta della sala. Questa terza tipologia è la più adatta in caso di principio di incendio in quanto allontana immediatamente i fumi dalla zona occupata dal pubblico, a differenza del meccanismo contrario che risulterebbe maggiormente difficoltoso.

La distribuzione dal basso è più flessibile in quanto permette di adattarsi facilmente a diverse condizioni di affollamento della sala. Ogni spettatore è servito infatti dalla portata d'aria adeguata, alla temperatura ottimale e nella zona richiesta. E' necessario ricordare che questo sistema, al fine di non provocare disturbo agli spettatori a livello delle caviglie, deve funzionare con differenziali ridotti tra la temperatura di immissione e quella ambiente e con basse velocità terminali. Inoltre l'aria immessa deve miscelarsi con quella dell'ambiente prima di arrivare nella zona occupata dalle persone.

Nuove tecnologie di diffusione dell'aria dal basso sono state sviluppate in Germania e nei paesi nordici. Le soluzioni finora più efficaci in grado di disporre di un microclima attorno allo spettatore senza effettuare il trattamento dell'intera sala sono:

- diffusori da piede di poltrona;
- diffusori da spalliera di poltrona;
- diffusori per gradinate.

Nel teatro Carlo Felice viene scelta la soluzione che adotta i diffusori da piede di poltrona PDP o sottopoltrona della Sagicofim poiché sono in grado di fornire il massimo delle prestazioni da un punto di vista termico ed acustico.

I diffusori vengono posizionati al di sotto delle poltrone per ridurre l'impatto estetico, in genere uno per ogni posto a sedere. Nel teatro Carlo Felice sono disposti simmetricamente in tutta la platea, collocati in posizione intermedia tra due poltrone, integrandosi nel sistema di montaggio e appoggio al pavimento. Tuttavia essi non si trovano esattamente sotto ogni singola poltrona; nella parte centrale della galleria la collocazione dei diffusori rispecchia quella della platea, lateralmente essi non sono presenti sotto le singole poltrone, a differenza invece dei palchi, in cui sotto ciascuna poltrona è presente una mandata.

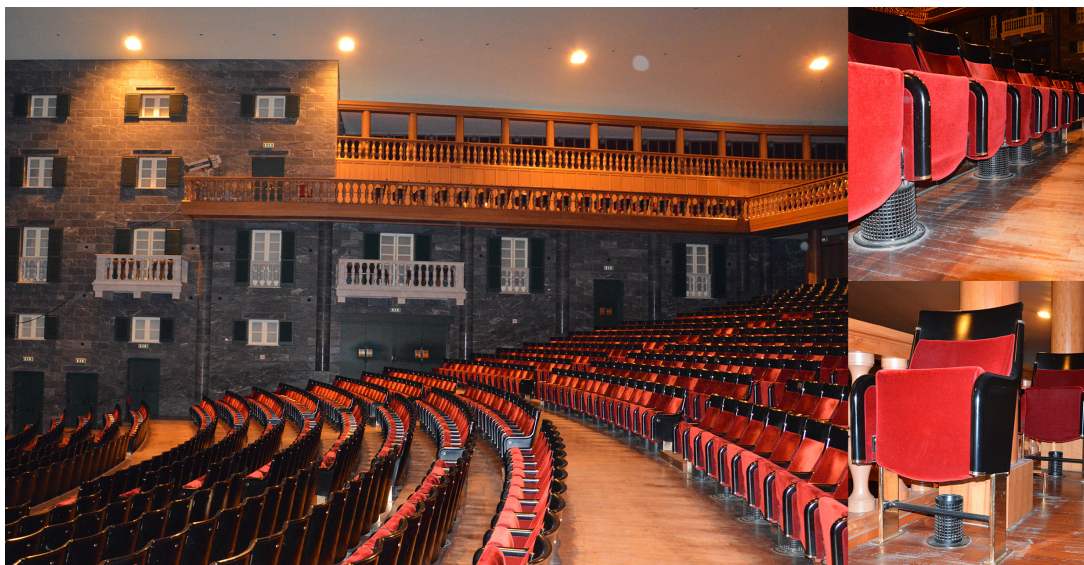


Fig.2.15 - A sinistra si nota la disposizione dei diffusori a PDP nella platea del teatro Carlo Felice, in alto a destra gli stessi vengono raffigurati con un maggior dettaglio, mentre in basso a destra si nota la differente disposizione e dimensione del singolo diffusore presente sotto ciascuna poltrona dei palchi.

Oltre alla versione standard PDP utilizzata nel teatro Carlo Felice ne esistono altre, quali la tipologia SI adatta a pavimenti inclinati e la versione L con diametro di maggiori dimensioni. tutti questi dispositivi vengono realizzati in acciaio verniciato RAL 9005 e variano dimensionalmente. Nella parte inferiore di ciascuna tipologia di diffusore è installato, con un idoneo raccordo al medesimo, l'elemento elicoidale di diffusione realizzato in PVC precaricato che garantisce un moto vorticoso all'aria immessa nel diffusore.

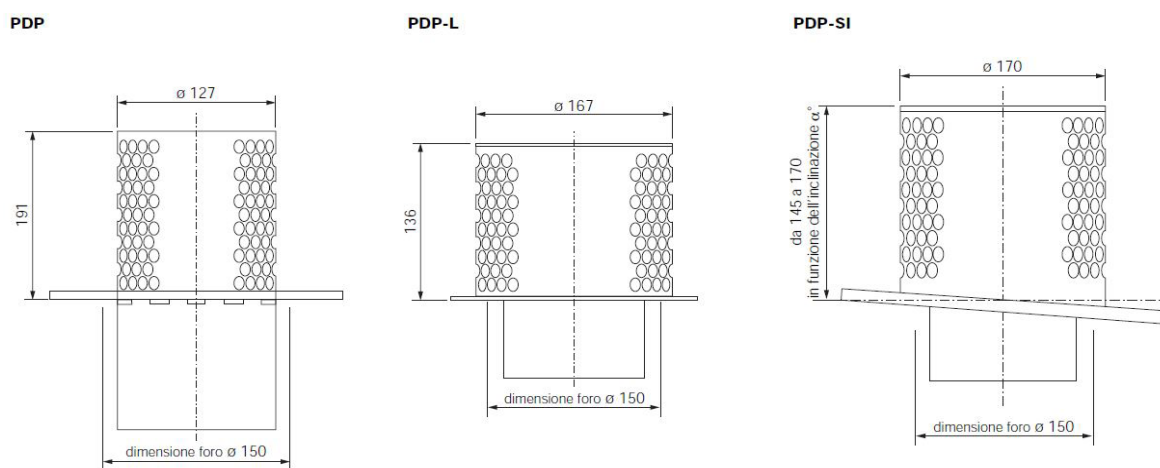


Fig.2.16 - Rappresentazione delle tre varianti del sistema di diffusione a PDP con le relative dimensioni geometriche.

Il primo impianto di climatizzazione realizzato dalla Sagicofim con la tecnologia PDP è stato quello per il Teatro Regio di Torino in collaborazione con il Politecnico, nel 1993, a cui sono seguite altre numerose realizzazioni come nel Teatro Rossini di Pesaro, nel Teatro

Verdi di Pordenone e nel Teatro Comunale di Iesi. Questa tecnologia, adottata in una prima applicazione in Italia, ben presto si è diffusa negli auditori di tutto il mondo.



Fig. 2.17- Esempi di applicazione del sistema di diffusione a PDP, a sinistra nell'Auditorium Joseph Haydn di Bolzano, a destra nel Teatro Ariosto di Reggio Emilia

Ambiente	Città	N° diffusori
Teatro Rossini	Pesaro	160
Auditorium Zurich Assicurazioni	Milano	150
Cinema Manzoni	Bologna	1100
Cinema Teatro Cristal	Salò (BS)	500
Auditorium Joseph Haydn	Bolzano	650
Teatro Verdi	Pordenone	1000
Teatro Malibran	Venezia	350
Auditorium Niccolò Paganini	Parma	780
Centro Congressi Cotone	Genova	430
Sala Consiliare Regione Lombardia	Milano	340
Aula liturgica Chiesa Nuova Padre Pio	San Giovanni Rotondo (FG)	900
Auditorium Il Sole 24 Ore	Milano	250
Teatro Comunale	Sarno (SA)	130
Sala Consiliare Provincia	Trento	50
Teatro Comunale	Bolzano	800
Auditorium Banca Popolare di Lodi	Lodi	850
Teatro Regio	Torino	1360
Tatro Carlo Felice	Genova	1000
Tatro della Corte	Genova	840
Multisala Arcadia	Melzo (MI)	1500
Auditorium Fiera Milano	Milano	550
Auditorium Glaxo	Verona	550
Scuola del Cinema	Palermo	500
Sala Consiliare Comunale	Sesto al Reghena (PD)	210
Auditorium Pontificia Università Urbaniana	Roma	100
Sala Don Ticozzi	Lecco	330
Auditorium ex Caserma Palestro	Mantova	180
Sala Comunale	Avellino	200
Auditorium	Guglionesi (CB)	230
Teatro Augusteo	Bolzano	700
Teatro Comunale Pergolesi	Jesi (AN)	250
Auditorium Banca Credito Coop. Del Garda	Montichiari (BS)	344
Teatro San Sisto	San Sisto (PG)	270
Barvikha Auditorium	Barvikha (Russia)	800
UBS Bank	Singapore	120
Auditorium Morgan Stanley	Hong Kong	110
Palacio de Congressos	Valencia (Spagna)	1050
Teatro Vasteras	Vasteras (Svezia)	470

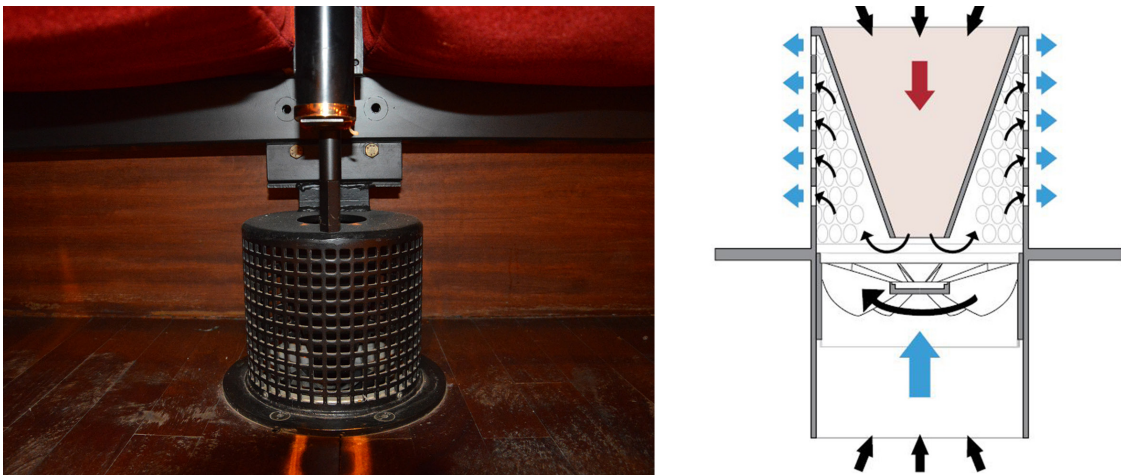
Fig.2.18 - Elenco degli auditorium e dei teatri in cui sono stati applicati i diffusori a PDP della Sagicofim negli ultimi 20 anni in Italia e all'estero

I diffusori da piede di poltrona, costituiti da un corpo cilindrico o ovalizzato dotato di una serie di fori, presentano la caratteristica di realizzare un effetto di microclima attorno allo spettatore. L'acustica ne ha simultaneamente beneficio poiché si abbatte il rumore di fondo a

valori intorno ai 25dB(A). Inoltre viene ridotto il costo energetico del 25% rispetto ai sistemi tradizionali.

L'alimentazione dell'aria primaria viene realizzata mediante un plenum posto sotto il pavimento rialzato. Il funzionamento consiste nell'entrata di aria primaria dal basso del corpo cilindrico, dove al suo interno una serie di deflettori con palette inclinate trasformano il moto dell'aria assiale in elicoidale. Ciò convoglia l'aria verso la parete forata del cilindro e il moto crea una depressione al centro del diffusore dove è posto un cono rovesciato che richiama aria dall'ambiente miscelandosi all'aria primaria.

Nella sala viene pertanto diffusa soltanto aria già miscelata, eliminando il rischio dovuto a correnti fredde localizzate nelle caviglie degli spettatori. Mediante tale meccanismo l'aria condizionata distribuita nel locale si miscela con l'aria ambiente per effetto dell'induzione del diffusore stesso. Quindi, il flusso risultante viene immesso in ambiente attraverso i fori ad una temperatura inferiore di appena 1-2°C rispetto a quella ambiente. I PDP funzionano con un differenziale di temperatura tra aria primaria e aria ambiente compreso tra 5 e 7°C. Pertanto, per ottenere nella sala una temperatura di progetto di 24°C, l'aria mandata deve essere compresa tra 17 e 19 °C, a seconda del differenziale. La portata d'aria nominale di ogni diffusore è compresa tra 8 e 17 L/s, circa 30 e 70 m³/h e corrisponde ai valori minimi di ventilazione con aria esterna prescritti dallo Standard ASHRAE.



Figg.2.19 a-2.19 b - Applicazione del sistema a PDP nel teatro Carlo Felice di Genova con annessa rappresentazione schematica del funzionamento dello stesso

Pertanto, al fine di ottimizzare la funzionalità dell'impianto sotto il profilo del comfort termo-igrometrico conferito al pubblico in sala, i parametri da considerare sono:

- la velocità dell'aria nei punti circostanti le poltrone (effetto dinamico);
- l'omogeneità della distribuzione delle temperature nei punti circostanti le poltrone (gradiente termico);
- il rapporto di induzione tra aria immessa dal diffusore e aria presente nell'ambiente (miscelazione rapida);

- l'umidità relativa dell'aria ambiente nell'intorno dello spettatore;
- la portata d'aria in gioco per ciascun posto-spettatore (consumi energetici).

In base a tali parametri appena elencati, riassumendo, le caratteristiche prese in considerazione nell'analisi dei diffusori a PDP del teatro Carlo Felice di Genova sono le seguenti:

Posti a sedere: **2000**
 Diffusori installati: **1000**
 Portata unitaria: **60-45-30 m³/h**
 Diff. temperatura del progetto: **6 K**
 Potenza sonora: **20-25 dB(A)**
 Altezza diffusore: **190 mm**
 Diametro diffusore: **197-123 mm**

Si noti che vengono richiesti tre valori di portata per singolo diffusore (60-45-30 m³/h). Il diffusore da 60 m³/h viene previsto ogni due poltrone, mentre quello da 45 m³/h nei casi in cui due diffusori servano tre poltrone, oltre ad essere impiegati come supporti delle poltrone stesse. Invece il diffusore da 30 m³/h, previsto sotto ciascuna poltrona dei laterali a quota +15,55, non viene utilizzato come supporto.

I diffusori da spalliera di poltrona prevedono che il sistema di miscelazione e di diffusione dell'aria sia realizzato nello schienale stesso della poltrona risultando tuttavia meno efficiente rispetto al sistema PDP. Come per il precedente meccanismo di diffusione l'aria primaria viene alimentata dal basso attraverso il plenum contenuto nel pavimento, contribuendo a realizzare un microclima individuale attorno allo spettatore.

Infine vi è la categoria dei diffusori per gradinate che vengono montati in due posizioni preferenziali: nell'alzato del gradone della platea oppure nel pavimento, sotto la poltrona. Nel montaggio sul lato verticale del gradino la fuoriuscita dell'aria può seguire una traiettoria inclinata, con posizionamento del diffusore intermedio tra due poltrone, oppure orizzontale, con collocazione esattamente sotto la singola poltrona. La distanza minima che deve essere mantenuta tra un diffusore e l'altro corrisponde a 600 mm e le dimensioni classiche utilizzate hanno forme quadrate, rettangolari o circolari. Questa tipologia viene adottata nel progetto preliminare del teatro Carlo Felice e sostituita con il sistema a PDP in seguito alla variante in corso d'opera nel novembre del 1989.

L'obiettivo comune alle tre tipologie descritte è il medesimo: quello di diffondere l'aria il più uniformemente possibile nell'intero ambiente, in modo da poterne effettuare un completo lavaggio. Inoltre è necessario che si verifichi la neutralizzazione dei carichi termici presenti nella sala teatrale. Essi vengono definiti come le potenze termiche che devono essere fornite (*heatingload*) o sottratte (carico frigorifero o *coolingload*) per mantenere l'ambiente in condizioni prefissate di temperatura e umidità. In tal senso, anche all'interno di una sala teatrale è necessario valutare diversi parametri, tra i quali i profili di utilizzo, le persone, etc., che sommati contribuiscono a ottenere la totalità del carico termico.

L'utilizzo della sala è limitato al periodo dello spettacolo che si svolge solitamente nelle ore serali, con durata media di 2-3 ore. Inoltre non si ha un utilizzo della sala continuativo durante l'anno, ma specialmente in primavera e autunno. Nel caso in cui vengano effettuati più spettacoli, magari pomeridiani e serali, è possibile adottare tecniche di preraffreddamento.

Esso può essere effettuato alcune ore prima dello spettacolo mediante l'accensione anticipata del gruppo frigorifero. Questo comporta che, dal punto di vista del benessere ambientale, il pubblico venga inizialmente sottoposto ad una temperatura inferiore di quella ottimale (immessa a circa 15 °C). Pian piano con il riempimento della sala e lo svolgimento dello spettacolo questo effetto diminuisce. Il ricorso a questo sistema è consigliabile soltanto quando la sala viene usata nelle ore più calde di giornate estive. Durante il giorno, quando si svolgono le prove, la sala ed il foyer devono essere soltanto ventilati, mentre il palcoscenico e le sale prove vengono climatizzati a carico ridotto.

Il valore più elevato che influisce sul carico ambiente è dato dagli *spettatori*. La densità di una singola persona nella sala principale corrisponde circa a 0,7-1 persona/m². Generalmente si assume un livello di metabolismo di circa 1met, al quale corrisponde un valore di carico termico totale per persona di 100-110 W.

Il carico dovuto alla *ventilazione* costituisce una componente importante del carico totale. Infatti, come viene consigliato dalle norme ASHRAE, la sala principale del Carlo Felice viene mantenuta in leggera sovrappressione rispetto agli ambienti circostanti, in modo da evitare infiltrazioni dall'esterno, correnti d'aria dagli accessi oltre a perseguire la normativa antincendio.

Per quanto riguarda la sala ed il palcoscenico la quantità di *calore sensibile*^[1] dovuta all'irraggiamento e alla trasmissione dall'esterno è limitata nel teatro Carlo Felice in quanto le strutture perimetrali sono costituite da pareti opache e gli spettacoli si svolgono prevalentemente nel periodo serale.

E' possibile che nella platea, avente un'altezza superiore a 10 m, si verifichi la *stratificazione* di parte del calore al di sopra della zona occupata dagli spettatori. Sarebbe preferibile che questo fenomeno non avvenisse per non provocare disagi agli spettatori. Durante i periodi di minore affollamento e in inverno esso comporta un aumento del carico di riscaldamento. Durante il funzionamento estivo la stratificazione può contribuire in alcuni casi a ridurre il carico sull'impianto di climatizzazione.

Come si evince dalla relazione tecnica del luglio 1983 consultata all'interno dell'archivio del teatro stesso, esistono due tipologie di impianto adottate in base alle diverse zone del teatro e alle funzioni che svolgono.

Negli spazi in cui prevale il problema della ventilazione e del ricambio dell'aria, come sala principale, foyer, auditorium, palcoscenico, etc., sono stati previsti sistemi a tutt'aria (aria esterna + aria riciclata) con possibilità di variare automaticamente la percentuale di aria esterna in funzione delle esigenze e di utilizzarla direttamente come fluido raffreddante, quando possibile, in modo da ridurre al minimo indispensabile il fabbisogno frigorifero.

Questo sistema infatti solitamente si attua in edifici in cui il volume da condizionare è costituito da grandi ambienti con condizioni termoigrometriche di progetto uniformi (teatri, cinema, auditorium, ecc.). Quindi il controllo di tutte le grandezze microclimatiche, quali temperatura, umidità relativa, purezza e velocità dell'aria, si effettua mediante l'impiego di aria introdotta in condizioni di temperatura e umidità prefissate.

^[1] Il calore sensibile è dato dalla sommatoria degli apporti di calore che hanno come unico effetto l'aumento della temperatura; proviene dall'esterno per effetto della radiazione solare, della differenza di temperatura tra l'ambiente esterno e quello interno (trasmissione per conduzione attraverso le strutture) ed anche per effetto dei cosiddetti carichi interni, quali ad esempio le persone ed eventuali sorgenti di calore (illuminazione, macchine, motori, ecc.).

Nello specifico, nel teatro genovese, la regolazione avviene mediante un impianto a portata costante, che comporta una variazione della temperatura di immissione. In questo caso l'aria viene distribuita agli ambienti mediante un sistema di diffusione costituito da una rete di canali di mandata posizionati al di sotto delle poltrone nella sala e nella galleria.

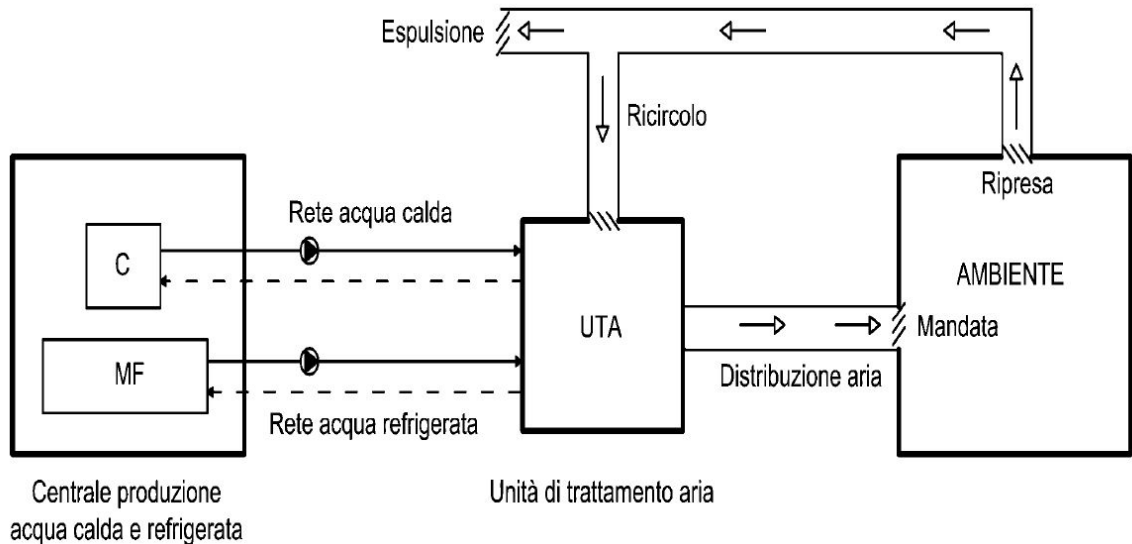


Fig.2.20 a - Schematizzazione generale di un impianto a tutt'aria

Per quegli ambienti invece dove ventilazione e ricambio dell'aria sono meno significative, come uffici, camerini, etc., e dove invece è prevalente la necessità di una regolazione indipendente per moduli o per piccoli locali, è stato previsto un impianto misto aria-acqua con ventilconvettori alimentati da acqua calda e refrigerata dalle centrali e da sistemi di aria (aria esterna). In questo modo, oltre alla possibilità di regolazione di temperatura singola sopra menzionata, è anche possibile far funzionare solo l'impianto di ventilconvettori, quando non ci sia presenza di persone.

Questo sistema solitamente viene applicato nella progettazione di volumi da condizionare divisibili in un numero elevato di ambienti, quali uffici, residenze e scuole. Nei locali viene fornita sia aria che acqua. Più dettagliatamente, l'aria, denominata primaria, è costituita da sola aria esterna, che viene opportunamente trattata in una U.T.A. ed inviata ai locali da climatizzare in modo che bilanci il carico termico latente. Il controllo dell'umidità relativa, della velocità e della purezza dell'ambiente viene effettuato dall'immissione di aria primaria. In questa tipologia di impianti non viene eseguito il ricircolo.

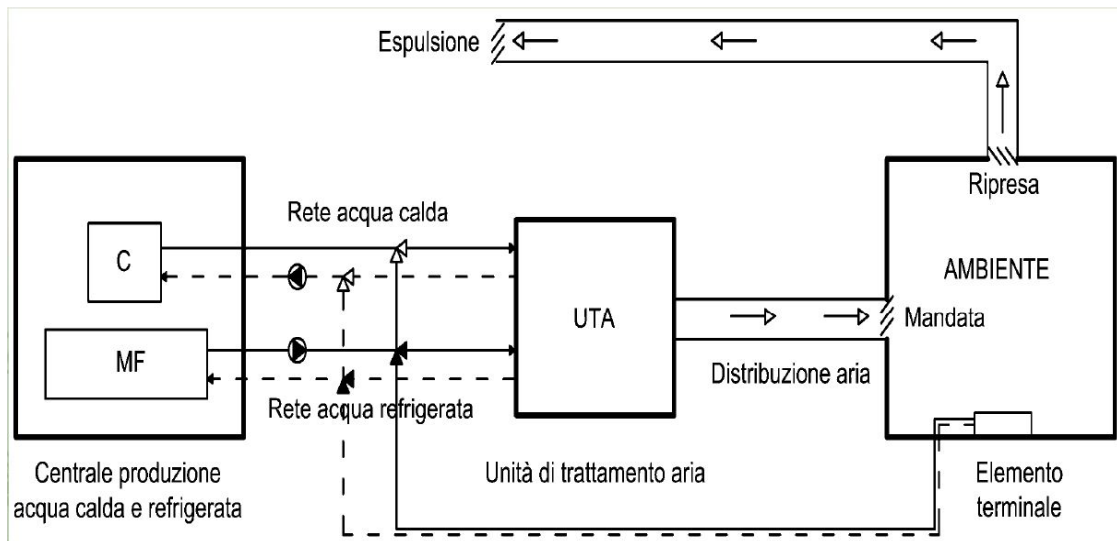


Fig.2.20 b - Schematizzazione generale di un impianto misto aria-acqua

Negli impianti di condizionamento a tutt'aria il problema principale per raggiungere le condizioni di benessere consiste nell'uniformare la diffusione dell'aria in ambiente. Il flusso d'aria di mandata deve lavare estesamente il locale, effettuando il numero di ricircoli prescritto, ma senza eccedere i valori di velocità indicati.

La normativa italiana prescrive che la *velocità* dell'aria nelle zone occupate dal pubblico che rimane seduto per un determinato periodo di tempo, dal pavimento fino ad un'altezza di 2 metri, non superi 0,15 m/s. Questo affinché non vengano percepite forti correnti, chiamate lame d'aria. Tuttavia alcuni progettisti adottano parametri più elevati di velocità, attorno a 0,25 m/s, in maniera da evitare quella sensazione di claustrofobia e di soffocamento che molte persone avvertono negli ambienti affollati.

Un ulteriore parametro da tenere in considerazione per un miglior comfort è la *temperatura*. Il valore varia tra i 22 e i 24°C all'interno del Carlo Felice sia in estate che durante l'inverno. La tolleranza, come spiegato precedentemente, è dovuta al fatto che con il preraffreddamento si ha una temperatura approssimabile a 15°C. In seguito, durante lo svolgimento dello spettacolo, viene aumentata a massimo 23°C dal momento che si abbassa l'attività metabolica degli spettatori. Inoltre si deve tener conto anche dell'abbigliamento del pubblico che assiste agli spettacoli. Esso, essendo durante l'anno quasi sempre di tipo formale, è caratterizzato da valori di resistenza termica dell'abbigliamento *C* variabili tra 0,2 e 0,7.

Strettamente connessa alla temperatura è l'*umidità relativa ambientale*. In presenza di un elevato affollamento essa deve essere compresa tra il 40-50%, poiché valori inferiori potrebbero favorire la diffusione di batteri e virus, mentre parametri superiori provocano disagio negli spettatori. Durante il periodo invernale l'umidificazione non è necessaria con la sala interamente occupata, mentre è indispensabile in climi molto rigidi e con affluenza di pubblico ridotta. Durante l'estate, al fine di mantenere l'umidità relativa al valore di progetto, la deumidificazione risulta necessaria in qualsiasi condizione di affollamento e richiede il successivo postriscaldamento dell'aria.

Per quanto riguarda la *qualità dell'aria* all'interno dei teatri si segue la norma UNI 10339 che sancisce che la portata d'aria esterna deve essere determinata in funzione del rapporto tra

il volume V e l'affollamento n, espresso in metri cubi per persona. I valori minimi consigliati dalla normativa ASHRAE sono i seguenti:

- sala spettatori: 2,5 L/s a persona + 0,35 L/s.m²
- palcoscenico: 5 L/s a persona + 0,35 L/s.m²

Riassumendo i valori ottimali delle caratteristiche prese in considerazione risultano essere i seguenti:

Temperatura ambiente estiva-invernale: **22-24 °C**
Umidità relativa estiva-invernale: **40-50%**
Velocità dell'aria: **0,13-0,15 m/s**
Aria di rinnovo: **4-5,5 L/s a persona (sala)**
Filtrazione: **prefiltri 35%, filtri finali 85%** opacimetrico ASHRAE
Livello sonoro teatri: **30 dB(A), RC 20-25**

Entrando maggiormente nel dettaglio, lo studio della seguente tesi prende in considerazione tre zone circoscritte del teatro Carlo Felice: la sala principale, la fossa orchestrale e il palcoscenico.

Sala teatro

L'impianto viene suddiviso in tre zone (platea, galleria, palchi), ciascuna con propria regolazione di temperatura ambiente. Come già accennato in precedenza, la distribuzione dell'aria è prevista con mandata dal basso, diffusori sulle gradinate di platea e galleria, ma alimentate da plenum sottostante. La ripresa invece avviene dall'alto attraverso il controsoffitto della sala, in corrispondenza delle balconate.

Fossa orchestra

Essa possiede un trattamento indipendente ai fini di assicurare agli orchestrali il massimo comfort. La mandata dell'aria è realizzata da pavimento con apposito sistema di distribuzione a bassa differenza di temperatura tra ambiente e mandata, onde evitare fastidiose correnti d'aria.

Palcoscenico

Date le particolari condizioni di temperatura e pressione dell'aria richieste e le esigenze di funzionamento del palcoscenico sono previsti due impianti distinti per palcoscenico e retro del palcoscenico. L'immissione dell'aria viene effettuata con bocchette di mandata, posizionate lungo le pareti laterali del palcoscenico, mentre la ripresa è attuata con griglie posizionate in modo da ridurre al minimo l'effetto camino.

Capitolo 2 | Fonti immagini

- Fig. 2.1: <http://ceraunavoltagenova.blogspot.com>
- Fig. 2.2: Botto M., 1986, *Il teatro Carlo Felice di Genova storia e progetti*, Sagep Editrice, Genova
- Fig. 2.3: Botto M., 1986, *Il teatro Carlo Felice di Genova storia e progetti*, Sagep Editrice, Genova
- Fig. 2.4: <http://ceraunavoltagenova.blogspot.com>
- Fig. 2.5: <http://ceraunavoltagenova.blogspot.com>
- Fig. 2.6: *Theater design*, G.C. Izenour, New York, 1977
- Fig. 2.7: <http://ceraunavoltagenova.blogspot.com>
- Fig. 2.8: MAXXI, Valente E., Zanchettin V., 2010, I teatri di Carlo Scarpa: archivio e ricerca nelle collezioni del MAXXI Architettura, Electa, Milano
- Fig. 2.9: MAXXI, Valente E., Zanchettin V., 2010, I teatri di Carlo Scarpa: archivio e ricerca nelle collezioni del MAXXI Architettura, Electa, Milano
- Fig. 2.10: MAXXI, Valente E., Zanchettin V., 2010, I teatri di Carlo Scarpa: archivio e ricerca nelle collezioni del MAXXI Architettura, Electa, Milano
- Fig. 2.11: Fondazione Carlo Felice
- Fig. 2.12: Ferlenga A., Rossi A., 2004, Aldo Rossi: l'archivio personale: disegni e progetti delle collezioni del MAXXI Museo nazionale delle arti del XI secolo Roma, Federico Motta, Milano
- Fig. 2.13: Ferlenga A., Rossi A., 2004, Aldo Rossi: l'archivio personale: disegni e progetti delle collezioni del MAXXI Museo nazionale delle arti del XI secolo Roma, Federico Motta, Milano
- Fig. 2.14: <https://www.fondazionealdorossi.org/opere/1980-1989/teatro-carlo-felice>
- Fig. 2.15: Foto da sopralluogo
- Fig. 2.16: <https://www.sagicofim.com/prodotti/pdp>
- Fig. 2.17: <https://www.sagicofim.com/prodotti/pdp>
- Fig. 2.18: <https://www.sagicofim.com/prodotti/pdp>
- Fig. 2.19 a-2.19 b: Foto da sopralluogo
- Fig. 2.20 a-2.20 b: crbnet.it/FISICATECNICA/didattica/lezioni/edilizia/F.Classificazione_Impianti_condizionamento.pdf

3. La realizzazione del modello numerico

3.1 I criteri per l'impostazione del problema

Dopo aver dunque definito da un lato quali siano le logiche alla base della realizzazione di un modello numerico per l'analisi CFD, quali strumenti sia necessario utilizzare e quali siano le potenzialità di questo sistema, e, dall'altro, aver tracciato la storia e le caratteristiche attuali dell'oggetto su cui si procederà con la modellizzazione e l'analisi, la sala principale del Teatro Carlo Felice di Genova, ed aver individuato le caratteristiche specifiche del peculiare sistema di condizionamento e ventilazione, si può procedere con la definizione delle fasi da seguire, delle tappe da raggiungere nella realizzazione del modello numerico.

Innanzitutto la prima scelta è quella di iniziare ad analizzare il problema considerando un modello bidimensionale, come è già stato detto, infatti, la realizzazione di un'analisi CFD è sempre un processo laborioso, complesso e che richiede tempistiche rilevanti; tuttavia, come è semplice immaginare, se l'analisi deve essere svolta su un modello 2D, l'onere di calcolo sarà sempre minore da quello richiesto dal corrispondente modello tridimensionale, per il quale, inevitabilmente, il software dovrà eseguire i calcoli relativi ad un numero esponenzialmente più grande di celle, tipicamente un numero dell'ordine del milione o della decina di milioni di elementi.

Appare quindi evidente come, per lo meno in prima battuta, sia opportuno effettuare una modellazione bidimensionale, anche se infatti, non si coglieranno fenomeni fuori dal piano, sarà comunque possibile comprendere come i diffusori interagiscano con il volume d'aria della sala nel piano costituito dalla sezione longitudinale ed avere dunque una prima visualizzazione dei flussi che interessano l'ambiente principale.

Il numero inferiore di celle consente altresì di controllare in modo più agevole la simulazione e di poter quindi provare a mettere in campo diversi scenari: sarà ad esempio possibile vedere come la situazione possa variare tra quando la sala è vuota o solo parzialmente occupata a quando si registra il tutto esaurito, per comprendere quanto la presenza umana possa influenzare il buon funzionamento del sistema.

Si parte dunque da un modello più semplice per poter ottenere maggiore controllo sulla simulazione, per poter passare, in un secondo tempo, ad un modello tridimensionale più verosimile ma anche molto più complesso e laborioso da governare.

Le simulazioni vengono realizzate tramite il software *Fluent,solver* per la fluidodinamica di *Ansys Workbench* versione R2.

3.2 Analisi bidimensionali e tridimensionali

Con questa logica di base si decide dunque di procedere nella realizzazione del modello prima e nello svolgimento della simulazione poi, per poter progressivamente giungere alla comprensione dei fenomeni di fluidodinamica che interessano l'oggetto dell'analisi.

Per quanto riguarda le analisi bidimensionali e tridimensionali si seguirà un *iter* di realizzazione di modelli sempre più articolati e complessi che prevede i seguenti passi:

- 1) Sezione longitudinale con la rappresentazione dei soli diffusori e bocchette di mandata e ripresa;
- 2) Sezione longitudinale con l'inserimento di blocchi rappresentativi delle persone in platea;
- 3) Caso 2) con l'inserimento dei blocchi relativi agli orchestrali;
- 4) Sezione longitudinale con la rappresentazione distinta di sedute e spettatori;
- 5) Caso 4) con l'inserimento dei blocchi relativi agli orchestrali;
- 6) Caso 5) con l'inserimento delle scene;
- 7) Caso 6) con una differente temperatura di input dell'aria;
- 8) Modello tridimensionale.

Tali simulazioni consentiranno di poter apprezzare qualitativamente i fenomeni che interessano l'ambiente nel piano considerato.

Definita dunque la strategia con cui si decide di procedere nella realizzazione di modelli e simulazioni si può iniziare ad operare concretamente sull'oggetto principale dell'analisi, realizzando una sezione longitudinale della sala principale del teatro.

Di seguito vengono riassunte schematicamente le simulazioni prese in considerazione:

Simulazioni bidimensionali	Caso 1	Sezione longitudinale con i soli diffusori
		Sezione longitudinale con i diffusori in cui le portate sono calcolate equivalenti per unità di profondità
		Sezione longitudinale di confronto di un ipotetico teatro immaginario in cui la mandata è collocata nel soffitto della platea e la ripresa tra i gradoni
	Caso 2	Sezione longitudinale con i diffusori e i blocchi rettangolari rappresentativi delle persone in platea
	Caso 3	Sezione longitudinale con i diffusori, le persone in platea e l'inserimento dei blocchi di orchestrali nella fossa al di sotto del palcoscenico
	Caso 4	Sezione longitudinale con i diffusori, le persone in platea e l'inserimento delle poltrone schematizzate con un profilo ad L spesso 5 cm
	Caso 5	Sezione longitudinale con i diffusori, le persone in platea sulle poltrone e l'inserimento dei blocchi di orchestrali
	Caso 6	Sezione longitudinale con i diffusori, le persone in platea sulle poltrone, gli orchestrali e l'inserimento delle scene rappresentate come rettangoli spessi pochi mm
Caso 7	Sezione longitudinale con i diffusori, le persone in platea sulle poltrone, gli orchestrali, le scene, che differisce da tutte le simulazioni precedenti per la temperatura di input dell'aria, pari a 20°C anziché i canonici 15°C.	
Simulazione tridimensionale	Caso 1	Porzione centrale del teatro di larghezza 10 m in cui vi sono i diffusori, le poltrone, le persone in platea e nella fossa orchestrale

3.2.1 Caso 1

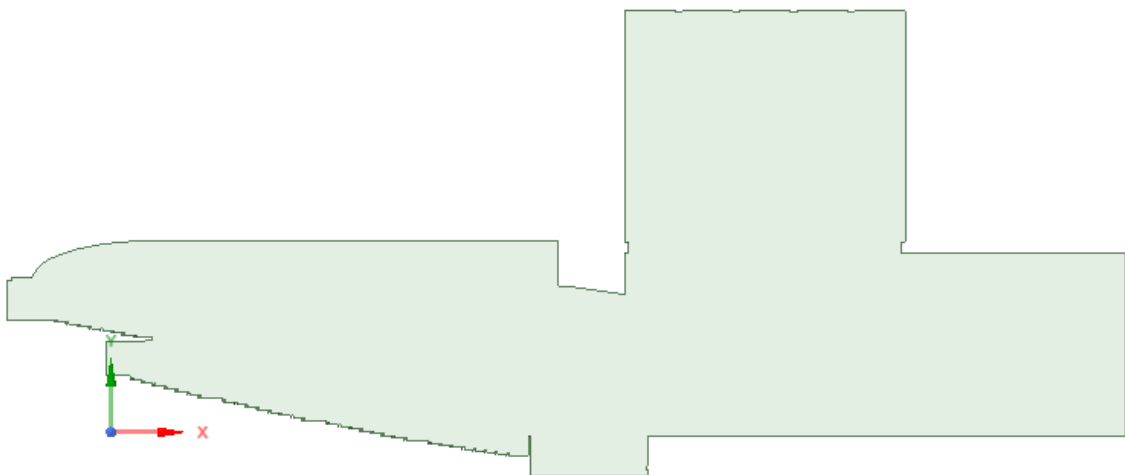
- **La definizione della geometria**

A partire dagli elaborati tecnici in formato cartaceo forniti dalla Fondazione Carlo Felice è stato possibile riportare su CAD l'andamento della sezione longitudinale della sala principale del teatro.

In prima battuta si è deciso di procedere con una sezione dei soli elementi architettonici, senza cioè modellare sedute o arredi per comprendere quali fossero le dinamiche in gioco all'interno dei grandi volumi coinvolti; si tratta di una notevole schematizzazione; un analogo processo ha caratterizzato anche la restituzione degli elementi architettonici per non rendere la geometria troppo complessa per la successiva elaborazione numerica.

La sala presenta all'incirca 2000 posti a sedere, distribuiti tra galleria, balconate e platea: quest'ultima risulta ulteriormente divisa in quattro settori in lunghezza e tre parti nella direzione trasversale. L'intero ambiente è realizzato a gradinata per ovvie ragioni funzionali, e ad ogni gradino corrisponde una fila di poltrone. All'incirca ogni due poltrone, a seconda delle esigenze di progetto, è presente un diffusore per la ventilazione che funge sia da mandata che da ripresa, come già precedentemente illustrato.

Tuttavia la ventilazione dei grandi volumi coinvolti non è demandata esclusivamente a questo sistema che, comunque, resta il sistema principale: la parte della torre scenica è condizionata a partire da specifiche bocchette di mandata e ripresa, le prime, a quota +37,75 m, costituiscono una griglia a soffitto di 4 x 4 elementi (si tratta di diffusori circolari di raggio pari a 50 cm), mentre le seconde, a +16,15 m, sono collocate, nel numero di dieci, lungo il perimetro interno della torre; la fossa dell'orchestra, infine, possiede delle bocchette di areazione rettangolari poste nella parte bassa della parete in prossimità del livello +2.75, esse svolgono solo una funzione di mandata dell'aria, mentre la ripresa è demandata sempre ai dispositivi della torre scenica e della sala.



I diffusori vengono modellati nella loro geometria più semplice: un rettangolo di lati 12,7 cm e 19 cm, per non gravare troppo sui già grandi oneri di calcolo; mentre le bocchette di

mandata della torre scenica sono schematizzate in sezione come dei rettangoli di lato 50 cm ricalanti rispetto al limite superiore della geometria, quelle di ripresa, costituite da semplici griglie metalliche rettangolari, come quelle della fossa dell'orchestra, vengono riprodotte come dei semplici segmenti di 32 cm posti in orizzontale nel caso della torre, dove è presente un rispettivo condotto di areazione, e in verticale per quanto riguarda la fossa, dove si collocano a filo della parete interna; sia per le bocchette di ripresa della torre scenica che per quelle della fossa dell'orchestra, è necessario, per esigenze di modellazione rappresentarle così, anche se, in realtà, le prime corrono lungo i due lati opposti alla sezione e quindi non sarebbe stato possibile inserirle se non così come è stato fatto e le seconde sono in parte disposte sulla parete in verticale e in parte in piano sulla pavimentazione, per semplicità è stata scelta la prima configurazione.

Si procede dunque con la restituzione grafica, realizzata nuovamente tramite *Space Claim*.

- **La discretizzazione**

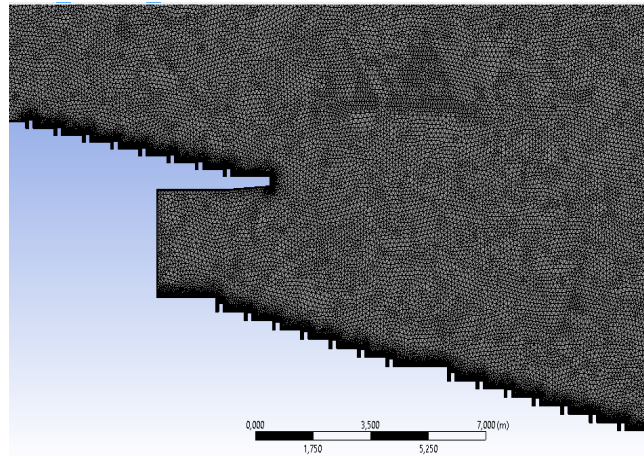
Una volta realizzata la geometria, è necessario passare alla discretizzazione.

Data la complessità della sezione, si rende indispensabile una *meshatura* prevalentemente costituita da elementi triangolari, che riesca facilmente a seguire l'andamento delle linee della geometria tali da formare una *mesh non strutturata*, così da poter ottenere con più accuratezza i dati relativi alla dinamica dei flussi in gioco.

Prima ancora di procedere con la *meshatura*, tramite lo strumento *NamedSelection* si definiscono le sezioni di mandata (*inlet*), di ripresa (*outlet*) e i confini fisici che si oppongono al flusso dell'aria (*wall*): questa è la premessa che consentirà successivamente di specificare le condizioni al contorno.

Si considera sempre un sistema unitario di condizionamento per tutta la sala, anche se in realtà la ventilazione di galleria e platea spettano a due diverse macchine refrigeranti, e lo stesso accade per la torre scenica e per la fossa dell'orchestra, ma la semplificazione è comunque resa possibile dal fatto che le condizioni che si vogliono garantire siano generalmente le stesse per le singole porzioni dell'architettura.

La maglia di discretizzazione viene scelta tenendo ben presente quali siano le due istanze da bilanciare: da un lato la necessità di precisione e dall'altra l'esigenza di tenere sempre sotto controllo gli oneri di calcolo. La grandezza media degli elementi risulta pari a 0,1 m e dove la griglia diventa più raffinata, in corrispondenza delle sezioni di mandata e ripresa, si riduce a 0,01 m.



Fornite queste impostazioni, le caratteristiche della *mesh* ottenuta risultano dunque le seguenti:

Elementi	428588
Nodi di Controllo	886041

Una volta verificato il congruo numero di elementi di discretizzazione e controllo, la qualità della *mesh* può poi essere definita a partire da due parametri:

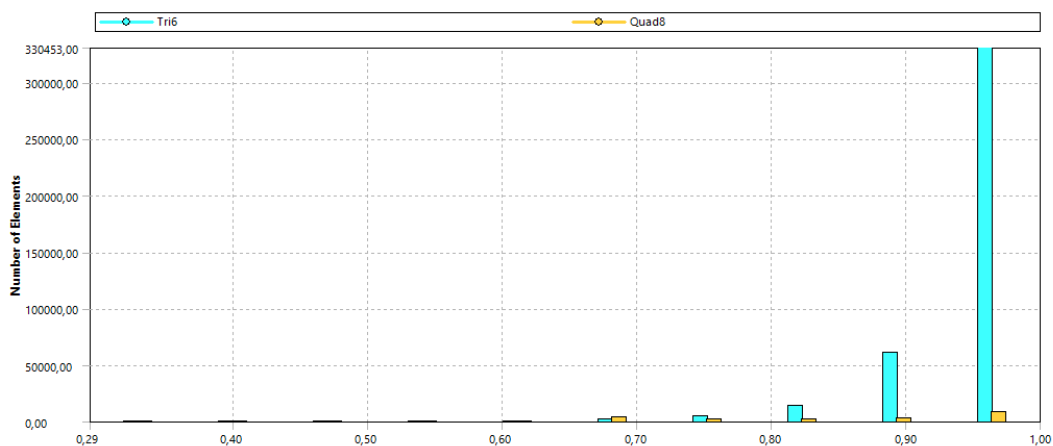
- l'ortogonalità
- la *skewness*

Da *Fluent* è possibile ottenere informazioni relative a queste due grandezze per valutare se la qualità ottenuta sia sufficiente.

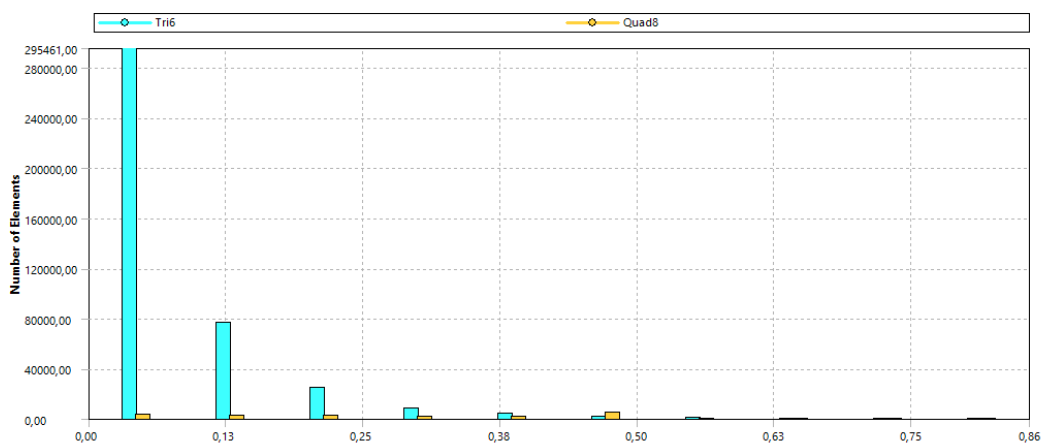
In particolare si possono ricavare degli istogrammi che vanno a misurare la frequenza dei valori relativi a tali parametri corrispondenti alle singole celle.

Per quanto riguarda la prima, la qualità della discretizzazione viene indicata con un *range* di valori compreso tra 0, il valore peggiore, e 1, il massimo realizzabile, ottenuto a partire dal confronto tra il vettore normale rispetto alla faccia dell'elemento *i*-esimo, il vettore che ne collega il baricentro con quello delle facce adiacenti e il vettore che collega il baricentro della cella ad ognuna delle facce

Il secondo valore indica sostanzialmente il grado di distorsione della cella, quanto cioè la cella in questione differisce da una cella ideale, equilatera e regolare. La valutazione di questo parametro viene fatta a partire dall'angolo Θ , che dovrebbe approssimare l'angolo retto, rappresentativo della condizione ideale, più tale valore differisce dal riferimento in eccesso o in difetto, più il calcolo potrà essere affetto da instabilità e incertezze. La condizione ideale è rappresentata dal valore 0 e la peggiore, corrispondente ad una cella completamente degenerata, viene identificata dal valore unitario.



Per quanto riguarda l'*ortogonalità*, appare evidente dal grafico, una buona qualità della *mesh* ottenuta in quanto la maggior parte delle celle è caratterizzata da valori superiori allo 0.8 e la totalità degli elementi presenta comunque valori superiori a 0.65. L'altro elemento che emerge da questo grafico è che la discretizzazione eseguita si struttura, come da quanto richiesto in fase di impostazione, prevalentemente di elementi triangolari, con l'eccezione di un esiguo numero di elementi quadrangolari.



Anche il grafico relativo alla *skewness* restituisce dati confortanti sulla qualità della *mesh*. Il valore caratterizzato da una maggiore frequenza è infatti pari a 0, corrispondente alla situazione ideale, e comunque, sia per quanto riguarda gli elementi triangolari che rettangolari, non si supera mai il valore di 0.5.

- **La definizione del modello fisico**

E' a questo punto necessario definire il modello fisico adatto a descrivere i fenomeni che interessano il volume di controllo.

Innanzitutto si tratta di un'analisi che verrà condotta in regime stazionario, non prendendo dunque in considerazione la variazione delle caratteristiche dell'aria nel tempo.

Il modello fisico scelto per entrambi i sistemi è quello *viscoso* abbinato ad un modello di turbolenza $k-\varepsilon$, e una funzione di parete standard.

Il modello di turbolenza $k-\varepsilon$ è un modello a due equazioni, che fornisce cioè per giungere alla soluzione del problema due equazioni aggiuntive rese necessarie dal maggior numero di incognite che caratterizza il moto turbolento, nel quale le grandezze subiscono fluttuazioni nel tempo.

Se infatti una soluzione numerica diretta (DNS) del moto turbolento richiederebbe un onere di calcolo insostenibile per la maggior parte dei supporti, dovuto al fatto che si dovrebbero risolvere tutte le scale della turbolenza e questo per fenomeni caratterizzati da un alto numero di Reynolds si tradurrebbe nell'analisi di una *mesh* con $10^9/10^{12}$ punti di controllo, si rende indispensabile il ricorso a metodi semplificati che si avvalgano di valori medi, poco significativi forse dal punto di vista della scienza pura, ma spesso sufficienti per l'approccio ingegneristico ai fenomeni.

Si ottengono così delle equazioni mediate nel tempo, che trascurano le fluttuazioni istantanee, considerandone sempre il valore medio, le *Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations* (RANS).

Per la risoluzione del problema si rendono così utili due equazioni aggiuntive che correlano la produzione di energia cinetica (k), con la dissipazione della stessa (ε); tali grandezze risultano legate da una relazione di diretta proporzionalità.

Successivamente devono essere immesse le condizioni al contorno, essenziali per la risoluzione di un problema descritto da equazioni differenziali.

In questo caso si prendono in considerazione tali caratteristiche dei flussi d'aria:

- la portata d'ingresso relativa ai singoli diffusori come da dati di progettazione esecutiva dell'impianto e successive relazioni tecniche è definita pari a 0,02 kg/s per la platea, si assume infatti che i diffusori in analisi abbiano una portata pari a 60 m³/s; mentre per la galleria la portata d'ingresso per diffusore viene definita pari a 45 m³/s;
- la portata di inlet delle bocchette presenti sulla sommità della torre scenica è pari a 1500 m³/h/cad;
- la portata di aria immessa della fossa dell'orchestra è pari a 3600 m³/h;
- la pressione della sala è stata assunta come costante e pari al valore di 1 atm, anche se in accordo con la normativa antincendio, la sala è sicuramente contraddistinta da una sovrappressione che facilita l'emissione di eventuale fumo, si tratta dunque di un'iniziale semplificazione;
- infine la temperatura di immissione viene inserita a 15°C, 288 K, come da valore oggi fornito dall'UTA.

Per quanto riguarda le portate di *outlet* in prima battuta si considera che siano corrispondenti a quelle in entrata così da garantire il rispetto della conservazione della massa all'interno del volume di controllo.

- **L'elaborazione della soluzione**

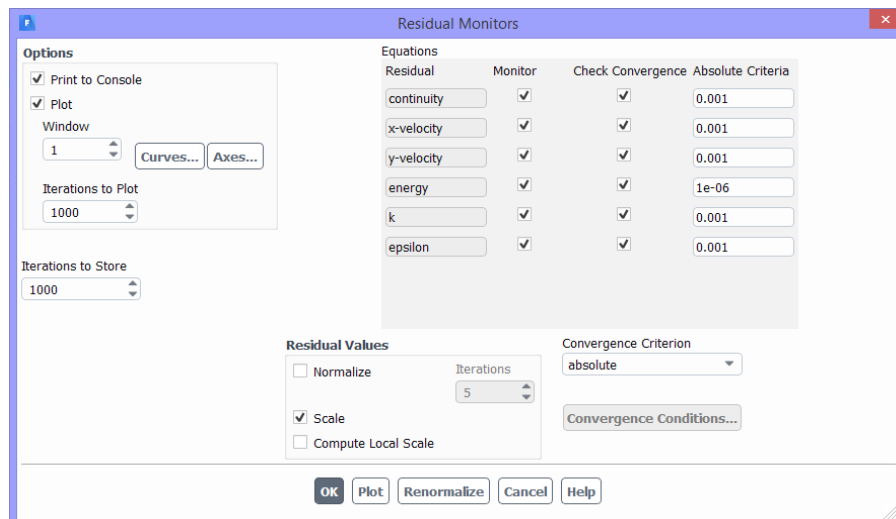
Definite le condizioni al contorno, si può procedere con l'inizializzazione. Questa prevede la definizione del numero di iterazioni che si suppongono sufficienti per giungere a convergenza.

Un numero maggiore di iterazioni dovrebbe condurre ad una soluzione più stabile, ma fa crescere altresì i tempi di calcolo.

Nei casi seguenti si procede inizialmente con 500 iterazioni, successivamente selezionando l'opzione *data sampling for steady statistics*, per ottenere l'andamento medio delle grandezze in gioco, si eseguono 2000 ulteriori iterazioni.

Bisogna poi tenere conto del fatto che per raggiungere la convergenza, l'altro elemento fondamentale è dato dalla tolleranza che si imposta relativa ai valori residuali: sarà proprio il raggiungimento di questi valori a determinare o meno la possibilità di trovare una soluzione.

I valori delle tolleranze residuali, sono di seguito elencati:



Definiti questi valori d'impostazione si può avviare il calcolo numerico che, procedendo per iterazioni visualizzate e monitorate da schermo, conduce alla convergenza.

Una volta raggiunta la convergenza, i risultati relativi all'intera sezione possono essere *post-processati* grazie al software *Ensignt*, sia in forma di *contour plot*, tramite un campo di isolinee o di *vector plot*, per visualizzare la direzione del flusso.

Si ottengono così i dati relativi a:

- temperatura
- velocità dell'aria

La prima simulazione è stata condotta con una semplificazione piuttosto significativa: le portate inserite come valori di *inlet*, sono in realtà quelle relative ai dispositivi di immissione dell'aria, quali bocchette e diffusori, nella loro tridimensionalità nonostante il volume di controllo considerato sia in questa fase bidimensionale.

Per questo primo caso si predispone dunque un confronto con lo stesso volume di riferimento in cui però i valori di portata di *inlet* e *outlet* vengono calcolati come quelli di portate equivalenti per unità di profondità: questo consente un approccio più "rigoroso" al problema che rispetta l'ipotesi iniziale di bidimensionalità.

Sostanzialmente si assumono dunque le portate del diffusore o della bocchetta nella sua tridimensionalità e si analizza a quale estensione in profondità corrisponda quel valore; successivamente si rapporta quell'estensione ad un metro di profondità, che rimane la grandezza unitaria di riferimento, ed in proporzione si ottiene la portata equivalente che si svilupperebbe in corrispondenza di ogni bocchetta o diffusore se si considerasse una sezione rappresentativa di profondità unitaria.

Questo consente di ottenere in maniera più rigorosa delle portate che siano coerenti con l'approccio bidimensionale che è stato scelto in questa prima fase.

Fermo restando dunque tutte le caratteristiche del modello precedente si assumono le suddette portate e si procede con l'analisi.

Ottenuti questi risultati può essere utile introdurre un termine di paragone.

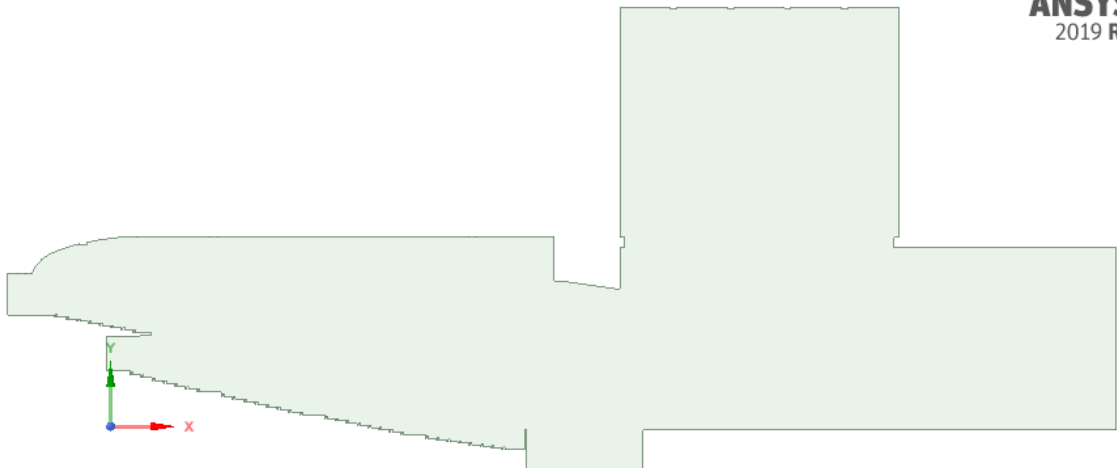
Il sistema impiegato per la ventilazione della sala principale del teatro Carlo Felice di Genova infatti risulta estremamente peculiare: l'impiego uniforme dei diffusori a piede di poltrona, come abbiamo visto, era una novità assoluta ivi utilizzata in maniera quasi pionieristica.

In questo senso si è pensato di realizzare un modello ipotetico della sala, immaginando la ventilazione a carico di sistemi più tradizionali: come avviene per molte sale teatrali analizzate in letteratura si è ipotizzato di attribuire l'immissione dell'aria ad una griglia di bocchette poste sul soffitto e la ripresa a pavimento inserita in corrispondenza delle alzate dei gradini.

- **La definizione della geometria**

A partire dalla sezione dell'architettura precedentemente ottenuta, si inseriscono trentotto bocchette di immissione dell'aria in corrispondenza del soffitto, di cui tuttavia cinque vengono poste al di sotto della balconata della galleria per garantire un'adeguata ventilazione anche alle ultime file della platea; si immagina quindi di disporle secondo una griglia di 7+1 file, di cui le prime cinque a partire dal fondo sono composte da cinque elementi ciascuna e le ultime due da soli quattro elementi: in sezione figureranno dunque cinque bocchette lungo il profilo del soffitto e una sola al di sotto della galleria. Tali bocchette vengono modellate come dei quadrati di lato 0.6 m.

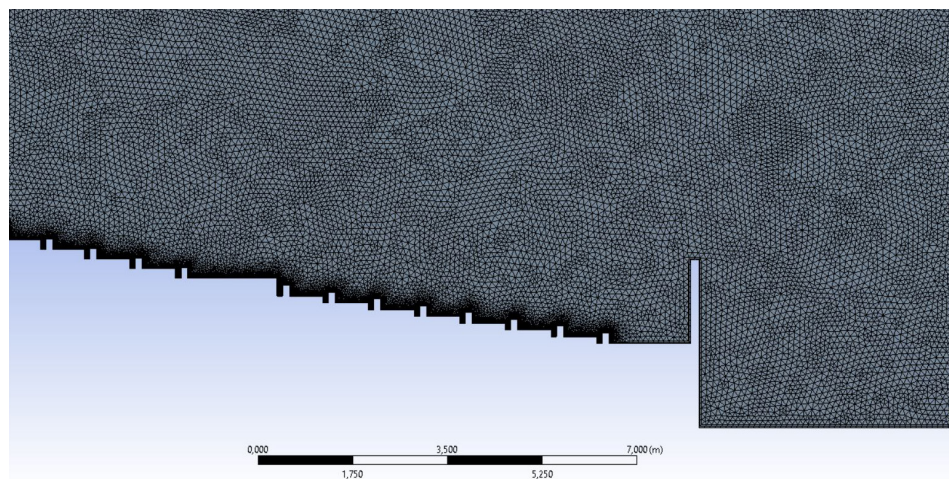
La ripresa dell'aria della sala, secondo quanto già detto, viene affidata alle alzate dei gradini corrispondenti alle diverse file di sedute; mentre per quanto riguarda la fossa dell'orchestra e la torre scenica il sistema di areazione si conserva inalterato.



- **La discretizzazione**

Anche in questo caso si procede con la realizzazione di una *mesh non strutturata*, con elementi di dimensione compresa tra gli 0.1 m, la dimensione media e gli 0.01 m lungo il perimetro e in corrispondenza delle bocchette di *inlet* e *outlet*.

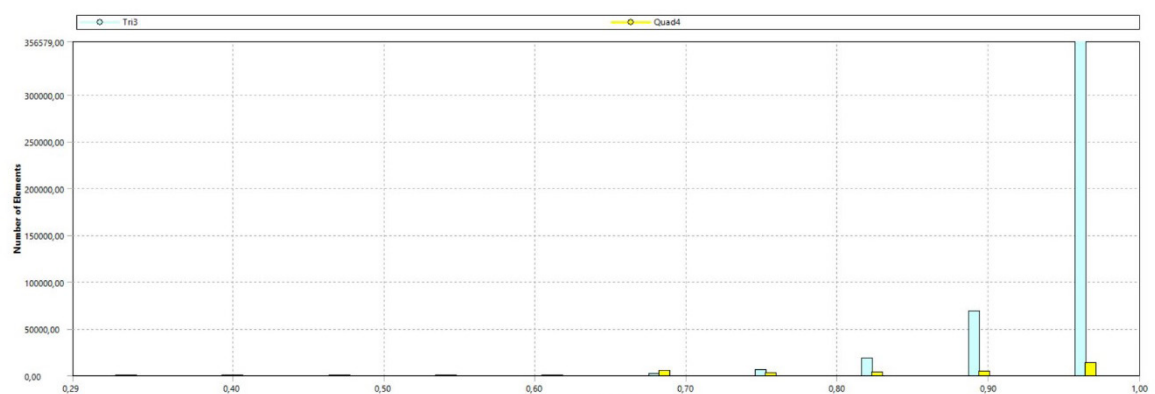
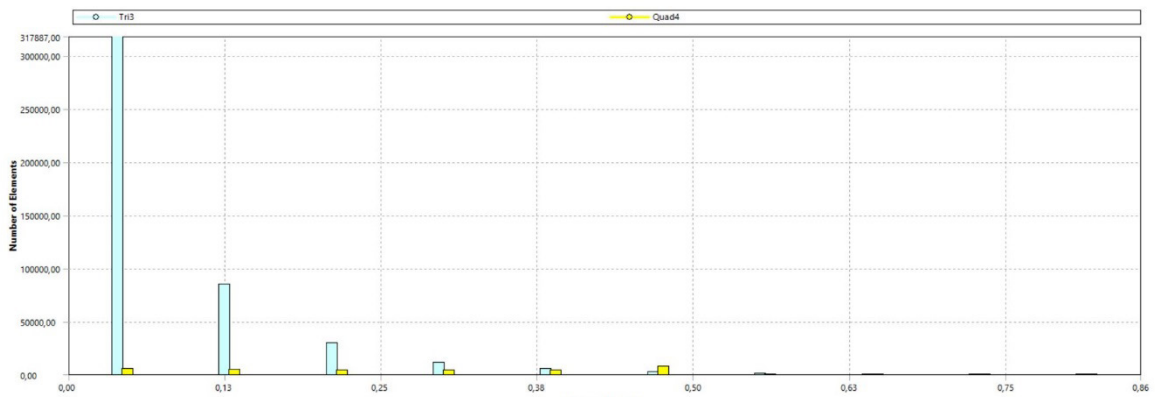
In particolare avendo mantenuto la geometria della simulazione precedente intatta, in via preliminare rispetto alla realizzazione della *mesh*, grazie allo strumento di *Named Selection*, si inseriscono le nuove sezioni di immissione e ripresa dell'aria e si considerano con condizione di parete adiabatica i diffusori a piede di poltrona, responsabili nelle altre simulazioni della ventilazione della sala.



La *mesh* così ottenuta presenta i seguenti parametri:

Elementi	479624
Nodi di Controllo	261588

Si verifica poi la qualità della *mesh* attraverso i già citati parametri di *skewness* e *orthogonal quality*.



In entrambi i casi si verifica che più del 70% degli elementi assume valori prossimi ai rispettivi estremi, zero per quanto riguarda la *skewness*, uno per quanto riguarda l'*ortogonalità*, approssimando dunque in buona misura la condizione ideale.

- **La definizione del modello fisico**

Per quanto concerne il modello fisico si assume quello usuale: un modello viscoso associato ad un modello di turbolenza $k-\varepsilon$ e una funzione di parete *standard*.

Tuttavia in questo caso sono le condizioni al contorno della sala a cambiare radicalmente. Se infatti per la torre scenica e la fossa dell'orchestra si conservano quelle precedentemente assunte:

- la portata di inlet delle bocchette presenti sulla sommità della torre scenica è pari a $1500 \text{ m}^3/\text{h}/\text{cad}$;
- la portata di aria immessa della fossa dell'orchestra è pari a $3600 \text{ m}^3/\text{h}$;

Per la sala si decide di considerare le caratteristiche standard di diffusori a soffitto, impiegati in cinema e teatri, e spesso analizzati in letteratura. Si considera quindi che esse debbano garantire una portata di aria immessa pari a quella offerta dal reale sistema di diffusori (16.45 kg/s complessivamente) ed ipotizzando una velocità di immissione pari a 1 m/s si ottiene una portata di *inlet* per ogni diffusore pari a 0.441 kg/s .

Tuttavia, seguendo l'approccio impiegato in molti studi di letteratura, si decide di differen-

ziare le velocità di immissione dell'aria per garantire un'efficace ventilazione della sala tra 0.8 m/s per le prime quattro file dal fondo, che sono caratterizzate da una minore altezza che le separa dalla copertura sia in platea che in galleria, 1 m/s per le due file centrali e 1.5 m/s per le ultime due in prossimità del palco, dove l'altezza del soffitto è massima.

Di conseguenza le portate risulteranno pari a:

- 0.353 kg/s per le prime quattro file dal fondo;
- 0.441 kg/s per le due file centrali;
- 0.662 kg/s per le ultime file in corrispondenza del palco.

Infine la temperatura di immissione viene inserita a 15°C, 288 K, come da valore oggi fornito dall'UTA.

- **L'elaborazione della soluzione**

Date queste impostazioni ed eseguito il numero adeguato di iterazioni, secondo le modalità precedentemente definite, è possibile ottenere i *contour plot*, la rappresentazione degli andamenti tramite isolinee di temperatura e velocità.

Successivamente questi possono essere *post-processati* tramite *Enight*, *software* di *Ansys* che consente di scegliere i range di rappresentazione delle diverse grandezze e di ottimizzarne la visualizzazione.

3.2.2 Caso 2

Si ottengono così i dati relativi ai flussi d'aria ed alle caratteristiche relative al confort interno, tuttavia sino a questo momento non è stato considerato un elemento fondamentale alla definizione delle condizioni interne: la presenza degli spettatori. Diversi studi in letteratura, come quelli già citati di Gamal El-Hariry, Essam Khalil e Waleed Abdel-Samee dell'Università del Cairo¹ o di Mateus e Carrilho Da Graca² o ancora di Chin Sze Jing³, hanno affrontato questa problematica con diversi approcci e diversi livelli di dettaglio o accuratezza.

In primo luogo si rendono necessarie due scelte: la prima riguarda il modo di schematizzare la presenza degli spettatori e la seconda lo scenario di affollamento da simulare.

Per la seguente simulazione si decide di schematizzare la presenza degli spettatori inserendo in corrispondenza di ogni seduta un semplice rettangolo che dovrà fungere da fonte di calore puntuale, cui verrà assegnato un valore adeguato in termini di flusso di calore corrispondente all'apporto di energia di una persona in condizioni *standard*.

Il grado di schematizzazione, è, come appare evidente, massimo anche per quanto riguarda la modellazione della presenza umana: tale scelta è ancora una volta dovuta al fatto che non si voglia ulteriormente appesantire un'analisi già di per sé molto complessa e dunque onerosa.

Il valore corrispondente all'apporto di energia del singolo spettatore può essere rintracciato in letteratura, ed in questo caso si assume pari a 60 W/m², come è stato fatto, ad esempio,

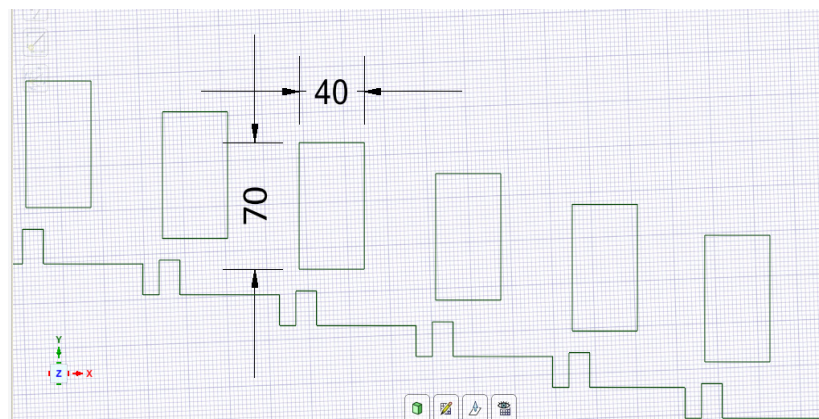
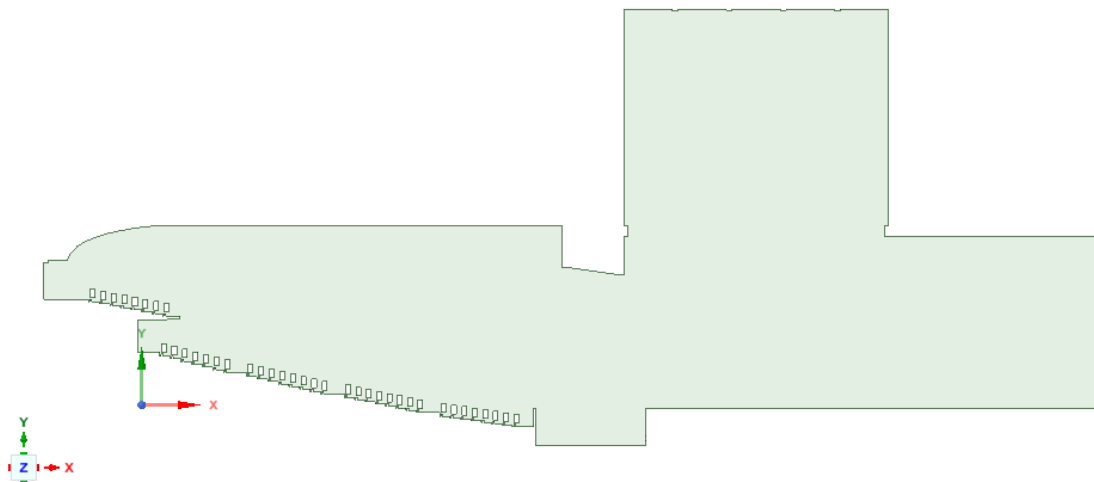
nel lavoro di El-Hariri, Khalil, Abdel-Samee¹, che a loro volta attingono dalle indicazioni ASHRAE del 2005: questo consentirà di poter simulare l'influenza che la presenza degli spettatori ha sul comfort interno della sala. Appare subito chiaro che, però, tale influenza sia più o meno pesante a seconda del numero di persone presenti in sala.

La seconda ipotesi da formulare è quindi quella riguardante lo scenario di affollamento: per questa simulazione si suppone che la sala sia al completo, che quindi tutti i posti, in platea e galleria, siano occupati.

Questo corrisponde alla condizione limite, caratterizzata dal maggiore apporto di calore esterno rispetto al sistema di condizionamento e quindi alla minore domanda di riscaldamento d'inverno ed alla massima richiesta di refrigerazione d'estate.

- **La definizione della geometria**

A partire dalla sezione precedentemente ottenuta per effettuare la simulazione relativa alla sala vuota, si procede con l'inserimento dei rettangoli come schematizzazione degli spettatori: si decide di realizzare dei rettangoli di dimensioni 0,40 m e 0,70 m e di posizionarli in corrispondenza di ogni seduta per poter modellare il tutto esaurito nella sala principale del teatro.



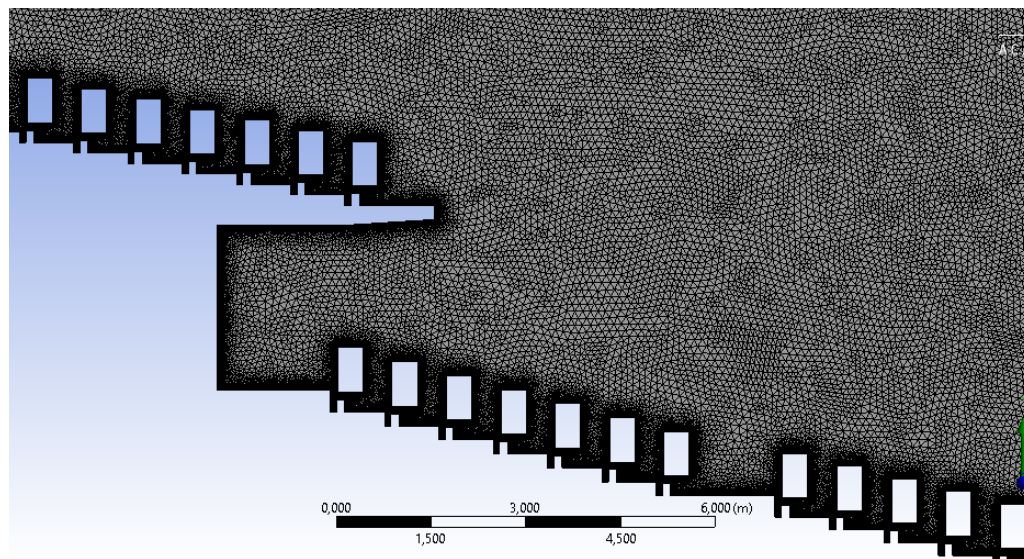
- **La discretizzazione**

Ancora una volta realizzata la geometria si procede con la discretizzazione e con la realizzazione della *mesh*.

La geometria in questo caso risulta particolarmente complessa, soprattutto a causa della presenza di diffusori e “spettatori”, e si rende necessario dunque utilizzare una *mesh non strutturata*, costituita nella quasi totalità da elementi triangolari.

Nella definizione preliminare del significato fisico dei diversi elementi con il consueto strumento della *NamedSelection*, si assumono le stesse attribuzioni del caso precedente (rif. Caso 1), con l’unica aggiunta della condizione di parete inserita anche in corrispondenza dei lati del rettangolo che modella la presenza umana cui successivamente verrà attribuita l’emissione di calore.

Le dimensioni ipotizzate sono, come nel caso della semplice sezione longitudinale, pari a 0,1 m in media per le celle centrali, mentre in corrispondenza del perimetro e, soprattutto di diffusori, bocchette e sedute, dove è necessario un ben più preciso tracciamento dei flussi d’aria, si riduce, portandole ad un decimo di quella originale, la scala degli elementi che assumono la dimensione di 0,01 m.



La *mesh* così ottenuta assume le seguenti caratteristiche:

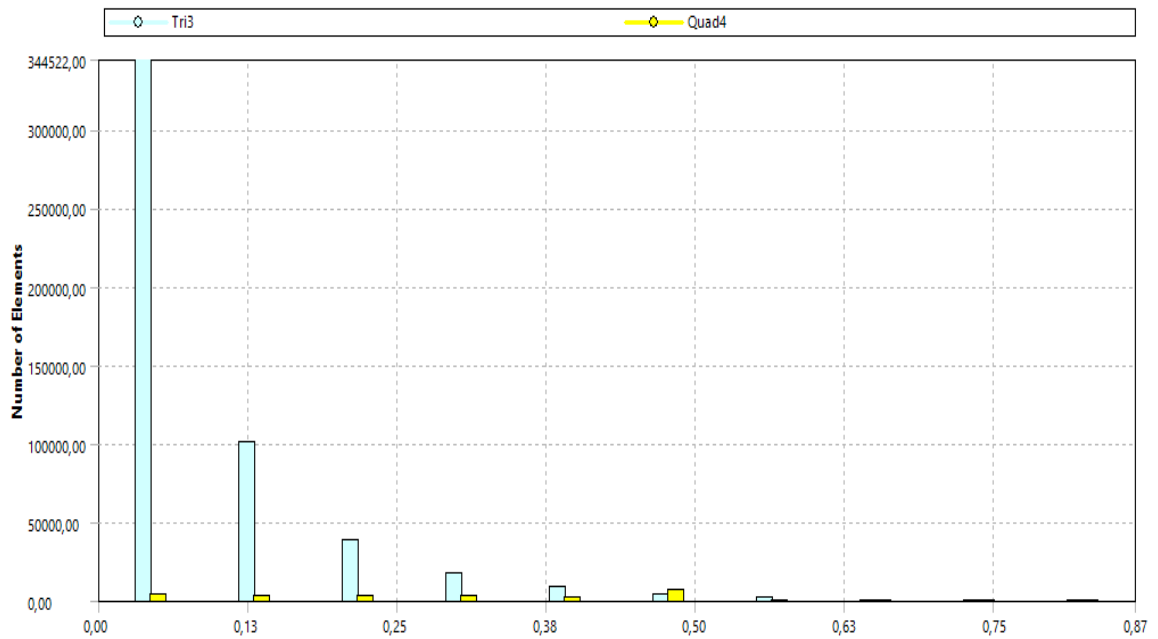
Elementi	536265
Nodi di Controllo	289399

Va osservato che il numero di elementi e nodi di controllo è aumentato significativamente rispetto al caso precedente e questo è dovuto al fatto che, a parità di geometria, la presenza degli spettatori richiede una maglia più fine per poter coglierne gli effetti sulle caratteristiche dell’aria circostante.

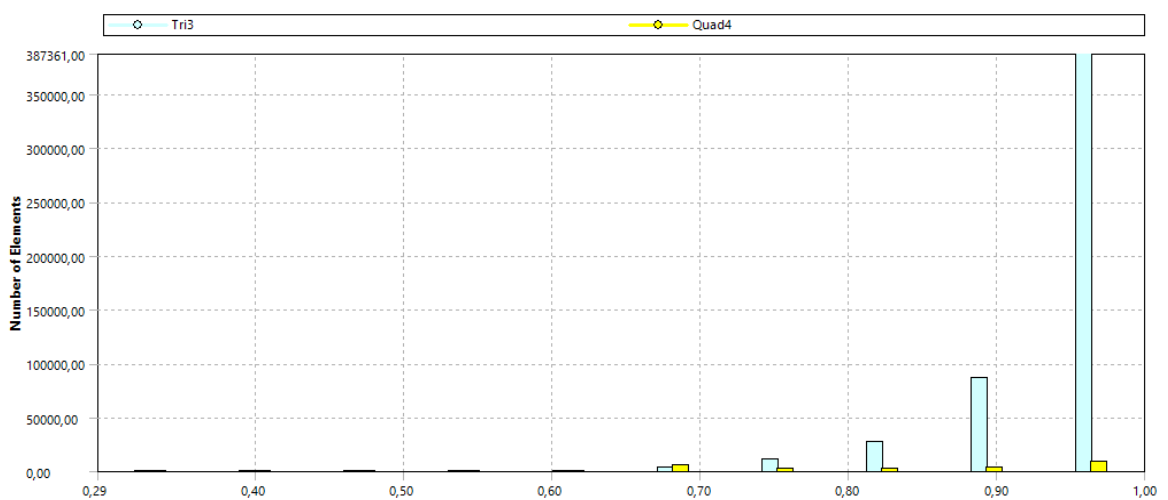
Come nei casi precedenti può essere interessante valutare la qualità della *mesh* attraverso i parametri di *skewness* e *orthogonal quality*.

Innanzitutto è possibile rilevare una notevole differenza dai casi precedenti: non è presente alcun elemento quadrangolare, la complessità della nuova geometria ha richiesto solo elementi triangolari per una *meshatura* precisa che riuscisse a seguire l'andamento delle linee.

Per quanto riguarda la *skewness* la sostanziale totalità degli elementi è contraddistinta da un valore inferiore allo 0,50, con una frequenza maggiore ottenuta per valori pari o inferiori allo 0.40.



Passando poi ad analizzare i valori relativi al secondo parametro, quello dell'ortogonalità, i valori ricadono prevalentemente nell'intervallo tra 0,65 e 1, con un particolare picco in corrispondenza del *range* compreso tra 0,80 e 1.



- **La definizione del modello fisico**

Per quanto riguarda il modello fisico, si assume lo stesso adottato precedentemente: un modello viscoso associato ad un modello di turbolenza $k-\varepsilon$ e una funzione di parete *standard*.

Anche considerando le condizioni al contorno, si conservano le stesse assunte precedentemente e allegate di seguito:

- la portata d'ingresso relativa ai singoli diffusori come da dati di progettazione esecutiva dell'impianto e successive relazioni tecniche è definita pari a 0,02 kg/s per la platea, si assume infatti che i diffusori in analisi abbiano una portata pari a 60 m³/s; mentre per la galleria la portata d'ingresso per diffusore viene definita pari a 45 m³/s;
- la portata di inlet delle bocchette presenti sulla sommità della torre scenica è pari a 1500 m³/h/cad;
- la portata di aria immessa della fossa dell'orchestra è pari a 3600 m³/h;
- la pressione della sala è stata assunta come costante e pari al valore di 1 atm, anche se in accordo con la normativa antincendio, la sala è sicuramente contraddistinta da una sovrappressione che facilita l'emissione di eventuale fumo, si tratta dunque di un'iniziale semplificazione;
- infine la temperatura di immissione viene inserita a 15°C, 288 K, come da valore oggi fornito dall'UTA.

- **L'elaborazione della soluzione**

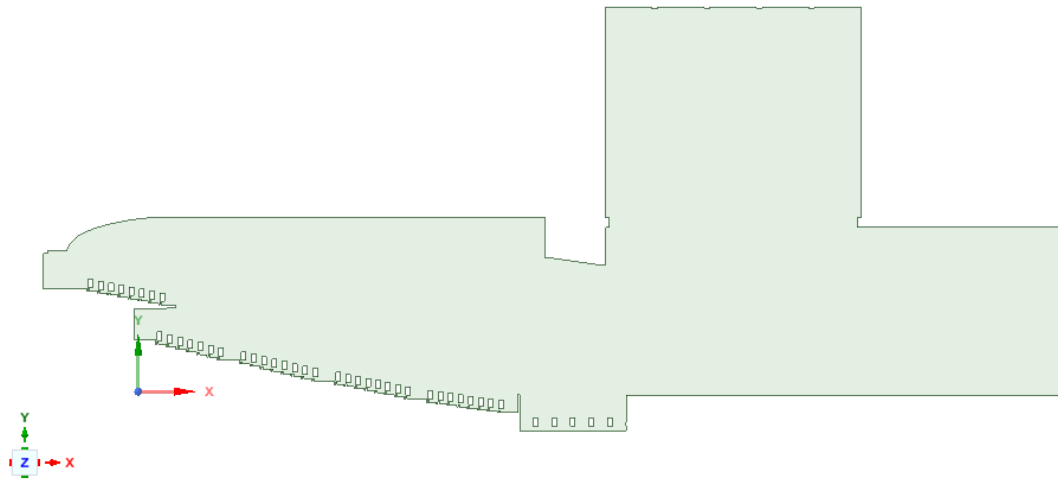
Dall'analisi così impostata si ottengono dunque i seguenti grafici che, in forma di *contour plot*, ci forniscono una rappresentazione qualitativa dell'andamento di temperatura e velocità dell'aria.

3.2.3 Caso 3

Nel caso precedente come presenza umana è stata considerata solo quella relativa agli spettatori, tuttavia per poter analizzare meglio i fenomeni relativi alla fossa dell'orchestra, che risulta interessata da correnti e temperature inferiori, si decide di prendere in analisi anche la presenza degli orchestrali per poter valutare la loro effettiva influenza dal punto di vista termico sulle dinamiche dei flussi.

- **La definizione della geometria**

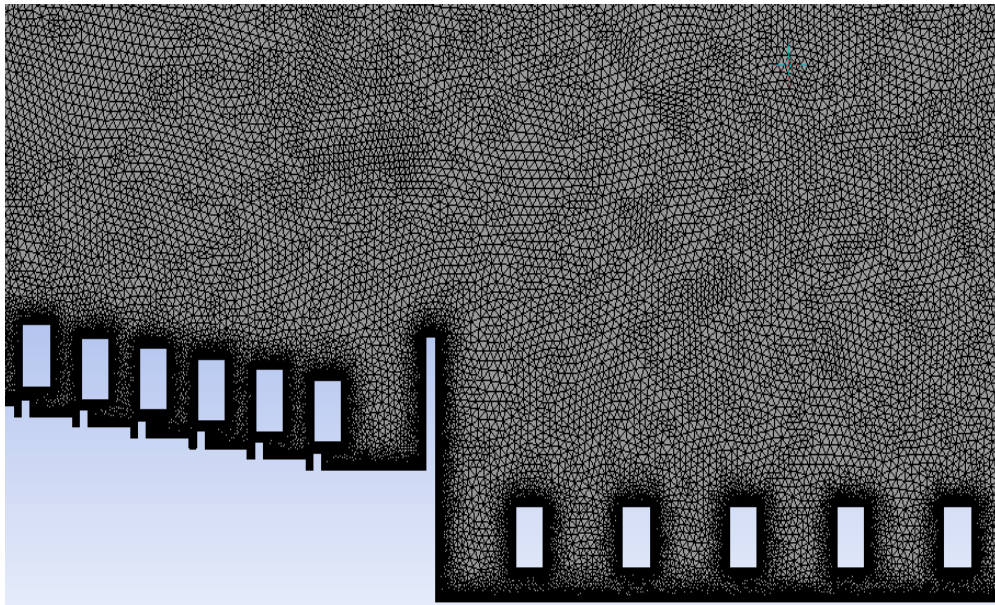
A partire dalla geometria precedentemente ottenuta per il caso 2), si procede con l'inserimento di alcuni elementi di orchestra nella fossa, modellati ancora una volta come rettangoli di dimensioni pari a 0.40 m e 0.70 m. In particolare vengono inseriti cinque elementi per riprodurre una possibile configurazione dell'orchestra.



- **La discretizzazione**

Per quanto riguarda la discretizzazione, si procede con la realizzazione di una *mesh non strutturata*, più adatta alla complessità della geometria, con dimensione degli elementi analoghe ai casi precedenti, 0.1 in media e 0.01 per gli elementi in prossimità delle sezioni di *inlet* e *outlet*.

Con lo strumento di *NamedSelection*, si attribuiscono le stesse condizioni al contorno dei casi precedenti e si procede successivamente con la *meshatura*.

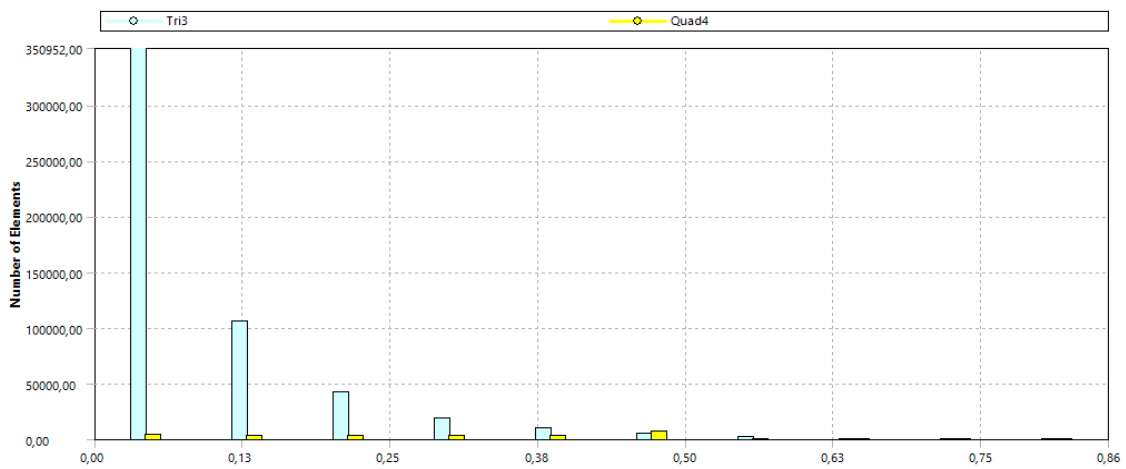


La mesh così ottenuta assume le seguenti caratteristiche:

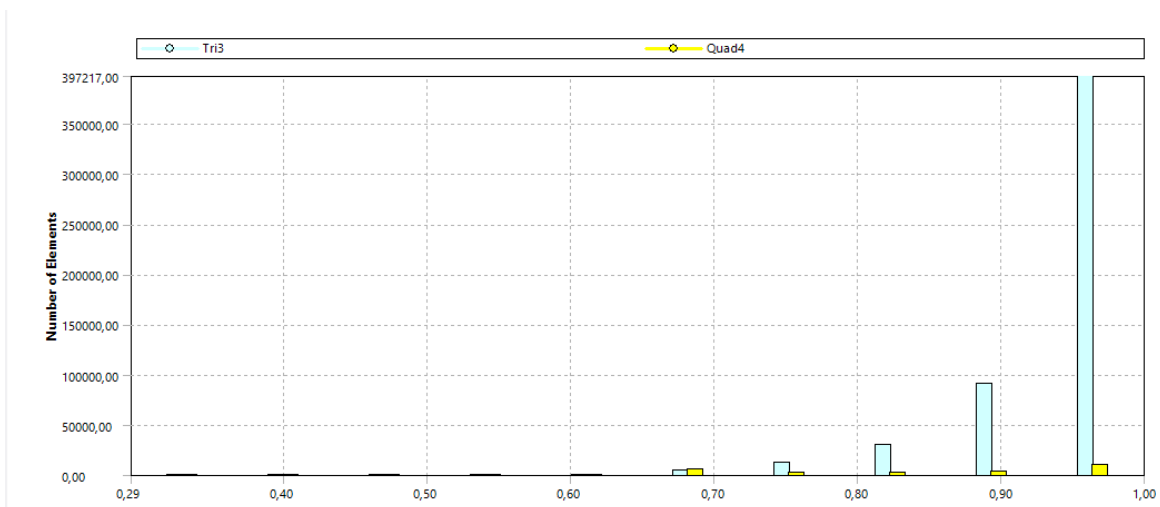
Elementi	556488
Nodi di Controllo	301005

Va osservato che anche questa minima variazione porta ad un significativo aumento del numero degli elementi di controllo, corrispondente al solo inserimento dei blocchi relativi agli orchestrali.

Si procede ora con la valutazione della qualità della *mesh*, analizzando gli istogrammi relativi a *skewness* e *orthogonalquality*.



Per quanto riguarda la *skewness* la buona qualità della *mesh* è confermata dai valori inferiori allo 0.50; e da valori di ortogonalità superiori allo 0.65 nella quasi totalità degli elementi.



- **La definizione del modello fisico**

Per quanto riguarda il modello fisico, si assume lo stesso adottato precedentemente: un modello viscoso associato ad un modello di turbolenza $k-\varepsilon$ e una funzione di parete *standard*.

Anche per quanto concerne le condizioni al contorno, si mantengono le stesse assunte precedentemente e ribadite di seguito per completezza:

- la portata d'ingresso relativa ai singoli diffusori come da dati di progettazione esecutiva dell'impianto e successive relazioni tecniche è definita pari a 0,02 kg/s per la platea, si assume infatti che i diffusori in analisi abbiano una portata pari a 60 m³/s; mentre per la galleria la portata d'ingresso per diffusore viene definita pari a 45 m³/s;
- la portata di inlet delle bocchette presenti sulla sommità della torre scenica è pari a 1500 m³/h/cad;
- la portata di aria immessa della fossa dell'orchestra è pari a 3600 m³/h;
- la pressione della sala è stata assunta come costante e pari al valore di 1 atm, anche se in accordo con la normativa antincendio, la sala è sicuramente contraddistinta da una sovrappressione che facilita l'emissione di eventuale fumo, si tratta dunque di un'iniziale semplificazione;
- infine la temperatura di immissione viene inserita a 15°C, 288 K, come da valore oggi fornito dall'UTA

- **L'elaborazione della soluzione**

Questi sono i criteri su cui viene impostata la simulazione, Al termine delle iterazioni si può avere un'idea dell'andamento qualitativo delle grandezze in gioco, ossia temperatura e velocità dell'aria.

3.2.4 Caso 4

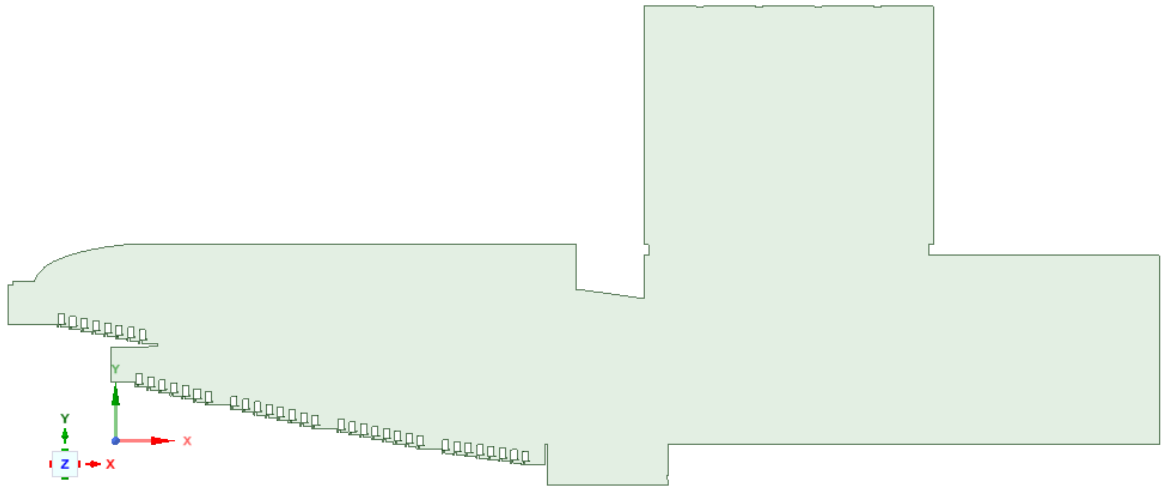
Analizzate dunque le precedenti configurazioni possibili per un grado di elevata schematizzazione, si sceglie di procedere con un nuovo modello caratterizzato da un maggiore livello di dettaglio per quanto riguarda le sedute e dunque la presenza degli spettatori.

Se infatti fino a questo momento si considerava un unico blocco rettangolare rappresentativo di seduta e spettatore, si decide ora di distinguere i due elementi modellandoli separatamente, per consentire una più realistica simulazione dei fenomeni che caratterizzano l'aria circostante i diffusori.

- **La definizione della geometria**

A partire dalla sezione originale, in corrispondenza di ogni fila di sedute si modellano le poltrone, schematizzate come delle sagome a forma di "L" di 5 cm di spessore; a tale sagoma

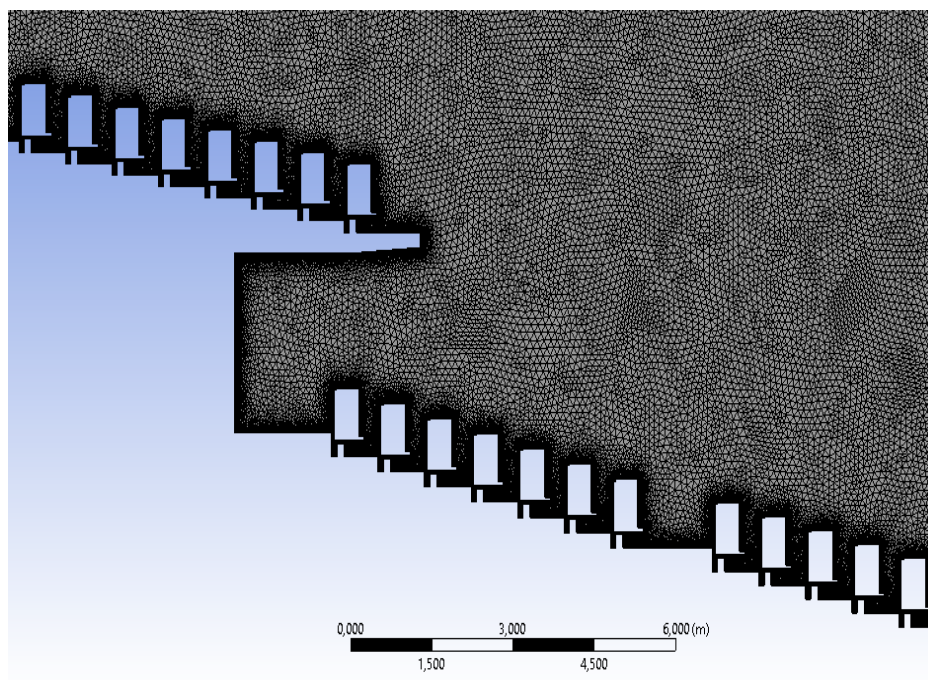
si addossa il blocco rettangolare di dimensioni 0.40 m e 0.70 m che rappresenta la vera e propria presenza dello spettatore.



- **La discretizzazione**

Data questa nuova configurazione per la realizzazione della *mesh* si adottano le stesse procedure seguite in precedenza: si impone di avere una *mesh* costituita prevalentemente da elementi triangolari, in grado cioè di seguire il sempre più complesso andamento del profilo della geometria.

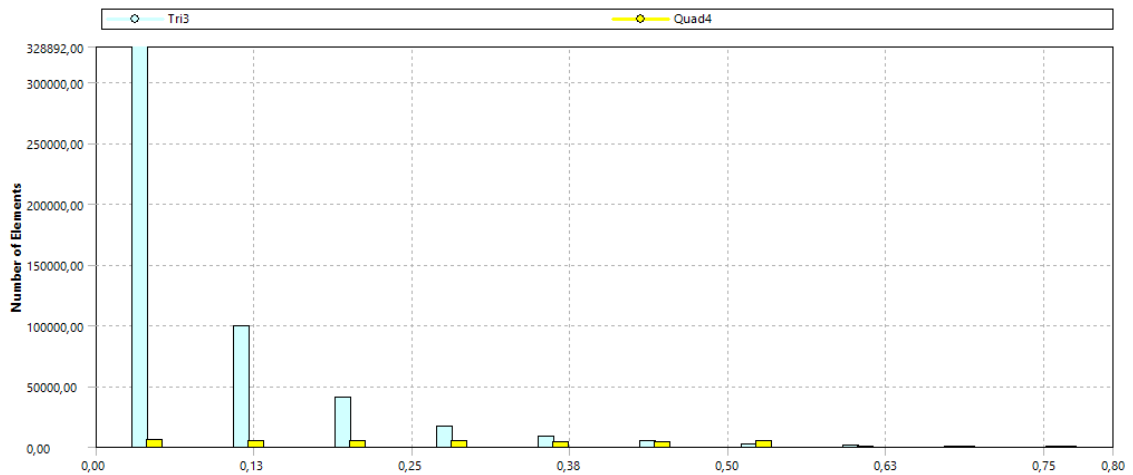
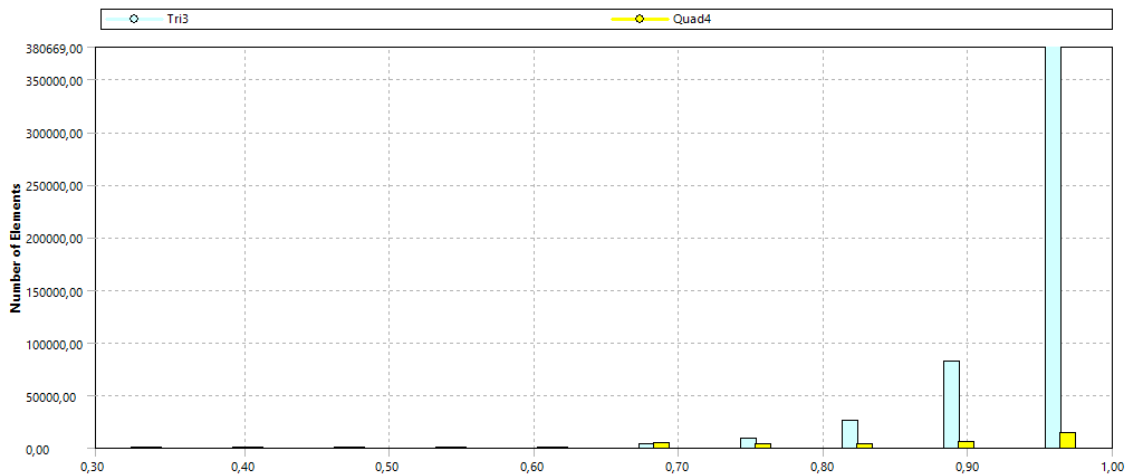
Si decide inoltre di adottare le stesse dimensioni per le celle di discretizzazione.



La *mesh* così realizzata assume le seguenti caratteristiche:

Elementi	531210
Nodi di Controllo	292132

Anche in questo caso, sia i valori di ortogonalità che di *skewness* ne confermano la qualità, con valori analoghi a quelli dei casi precedenti, superiori a 0.65 nel primo caso, inferiori a 0.55 nel secondo.



- **La definizione del modello fisico**

Per quanto riguarda il modello fisico, si assume lo stesso adottato precedentemente: un modello viscoso associato ad un modello di turbolenza $k-\epsilon$ e una funzione di parete *standard*.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno si assegnano le stesse utilizzate nei casi valutati in precedenza. L'unica differenza consisterà nel fatto che, sia per le poltrone che per i blocchi degli spettatori, venga scelta una condizione di *wall*, ma se nel caso dello spettatore questa è solo la preconditione per inserire una fonte puntuale di calore (pari a 60 W/m^2), per

quanto concerne le poltrone si sceglie la condizione di parete adiabatica.

- **L'elaborazione della soluzione**

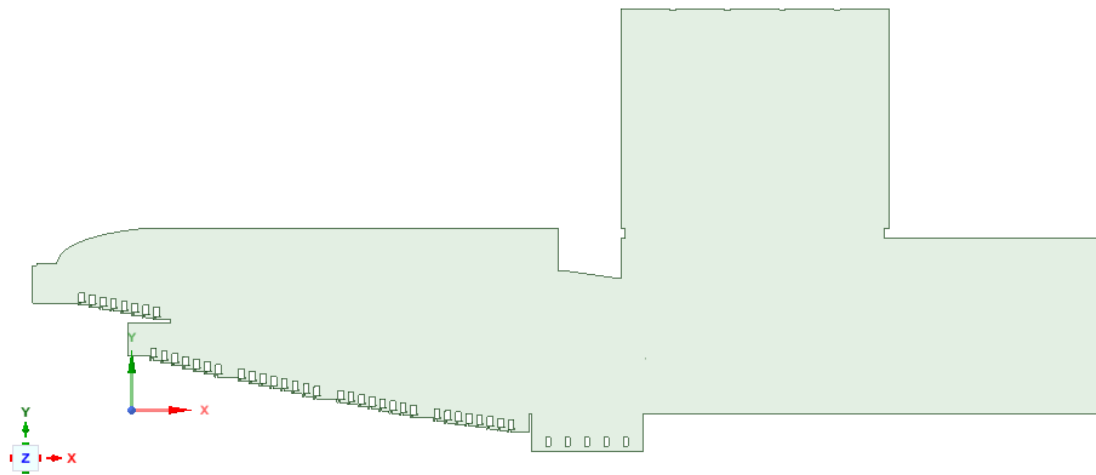
A partire da questi dati è possibile ricavare l'andamento qualitativo di temperatura e velocità dell'aria, visibile attraverso le isolinee dei *contour plots*.

3.2.5 Caso 5

Come già avvenuto per il caso 3) anche in questa simulazione si decide di aggiungere la presenza umana nella zona dell'orchestra per capirne nel dettaglio l'influenza sui flussi d'aria in questa parte del teatro particolarmente delicata dal punto di vista del *comfort* per la presenza di significative correnti.

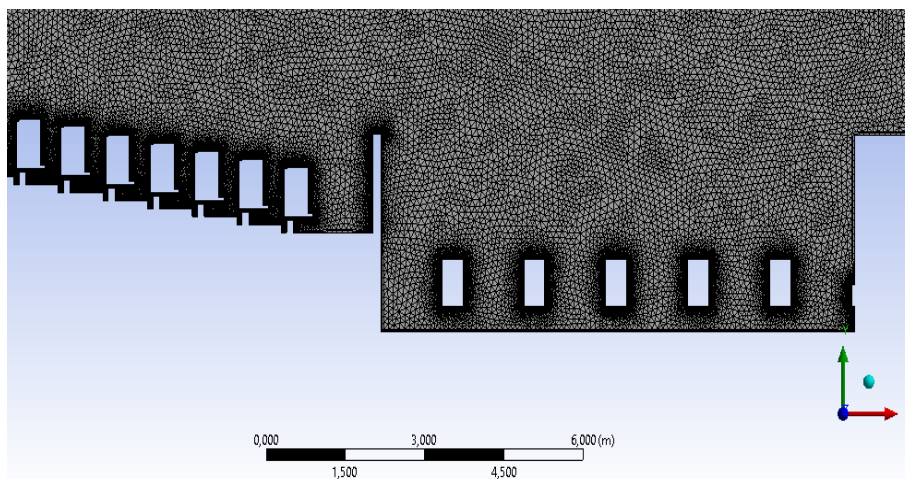
- **La definizione della geometria**

Analogamente al caso sopracitato si decide di partire dalla geometria di base, ora quella del caso 4) cui si aggiungono cinque blocchi per raffigurare i musicisti in una possibile configurazione dell'orchestra.



- **La discretizzazione**

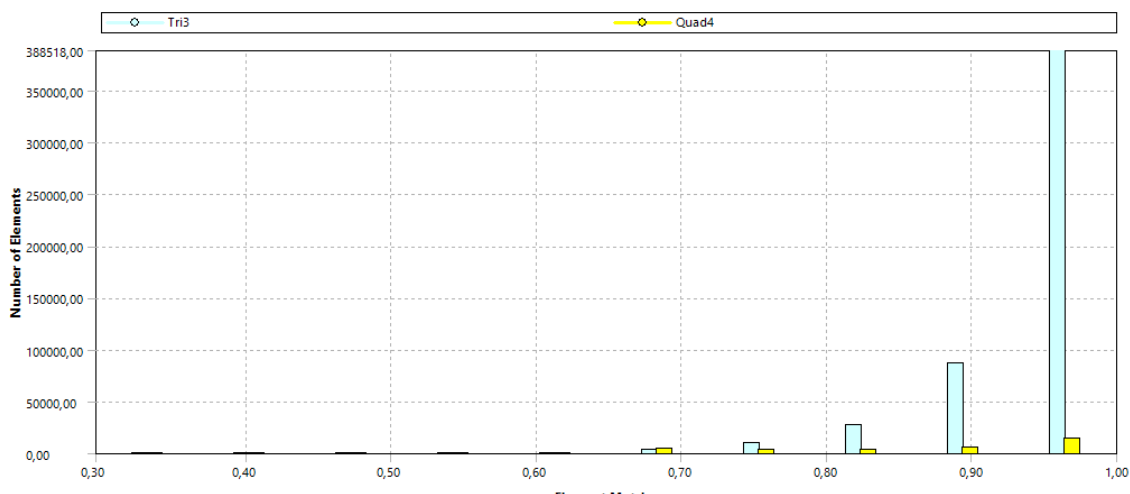
Ancora una volta l'operazione di *meshatura* viene impostata sulla prevalenza di elementi triangolari di dimensioni variabili tra 0.01 e 0.1 a seconda che ci si trovi o meno in prossimità delle sezioni di mandata e ripresa o dei blocchi delle persone.

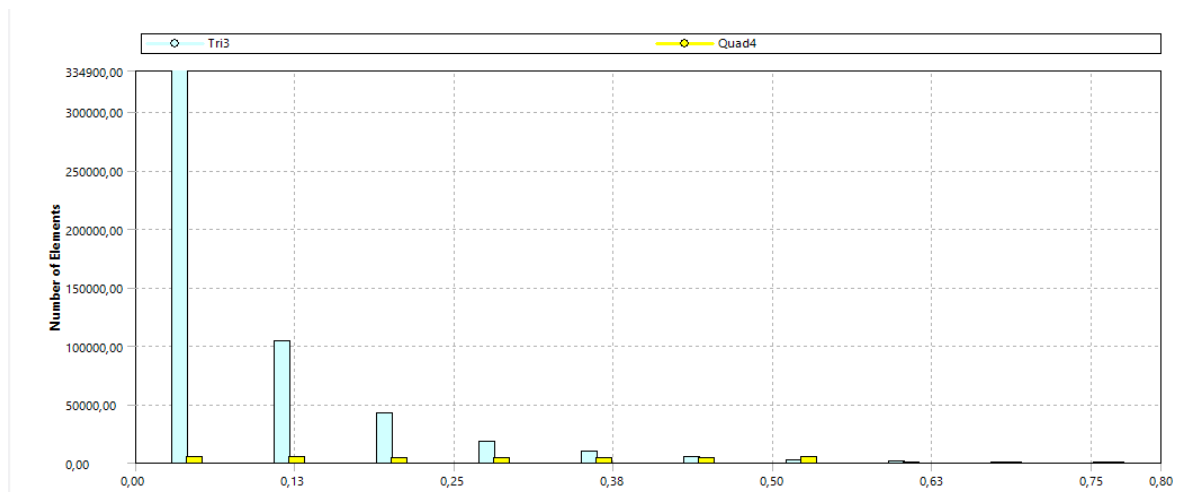


La mesh così realizzata assume le seguenti caratteristiche:

Elementi	546754
Nodi di Controllo	300737

Si procede con il controllo della qualità della *mesh* che, anche in questo caso non evidenzia particolari anomalie né per quanto riguarda l'ortogonalità, con valori che si conservano superiori allo 0.65, né per quanto riguarda la *skewness*, sempre inferiore allo 0.55.





- **La definizione del modello fisico**

Per quanto riguarda il modello fisico, si assumono quelli considerati in tutte le simulazioni precedenti: un modello viscoso associato ad un modello di turbolenza $k-\epsilon$ e una funzione di parete *standard*.

Anche considerando le condizioni al contorno, il caso non si discosta dalla simulazione precedente.

- **L'elaborazione della soluzione**

Definite quindi, anche questa volta, le condizioni al contorno e dopo aver portato a termine le iterazioni prefissate, è possibile ricavare i dati relativi alla distribuzione delle usuali caratteristiche dell'aria per poter ricostruire da un punto di vista qualitativo i fenomeni fluidodinamici che interessano la sezione longitudinale della sala principale.

3.2.6 Caso 6

Finora sono state considerate numerose simulazioni in cui gli elementi e i parametri in gioco erano prevalentemente quelli costituenti la sala e la fossa degli orchestrali.

Non sono state finora considerate le complesse dinamiche che interessano la torre scenica.

La torre infatti rappresenta un enorme volume d'aria, i cui fenomeni di natura fluidodinamica sono emersi nelle simulazioni precedenti come particolarmente significativi. E' infatti il luogo in cui si verificano le maggiori velocità assunte dall'aria e dove si manifestano le principali correnti.

Tuttavia nella maggior parte dei casi, per quasi tutti gli spettacoli, questo ambiente non risulta libero come è stato modellato in tutti i casi precedenti. Qui infatti vengono disposti i teli di scena che vengono fatti scendere o risalire a seconda della fase dello spettacolo in atto.

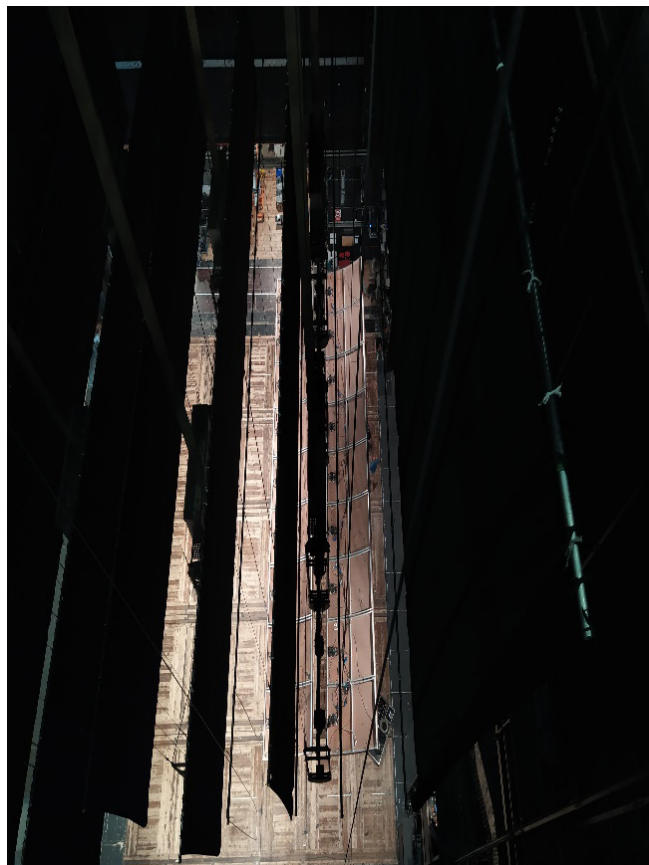


Fig. 3.1-Sistema di movimentazione delle scene all'interno della torre

Non era dunque consigliabile considerare concluse le simulazioni bidimensionali senza aver preso in analisi almeno un caso in cui le scene venissero considerate non come avvolte, e dunque assenti, ma come dispiegate, e quindi presenti effettivamente all'interno della torre, situazione per altro molto comune considerando uno spettacolo "standard" che può avere luogo in teatro.

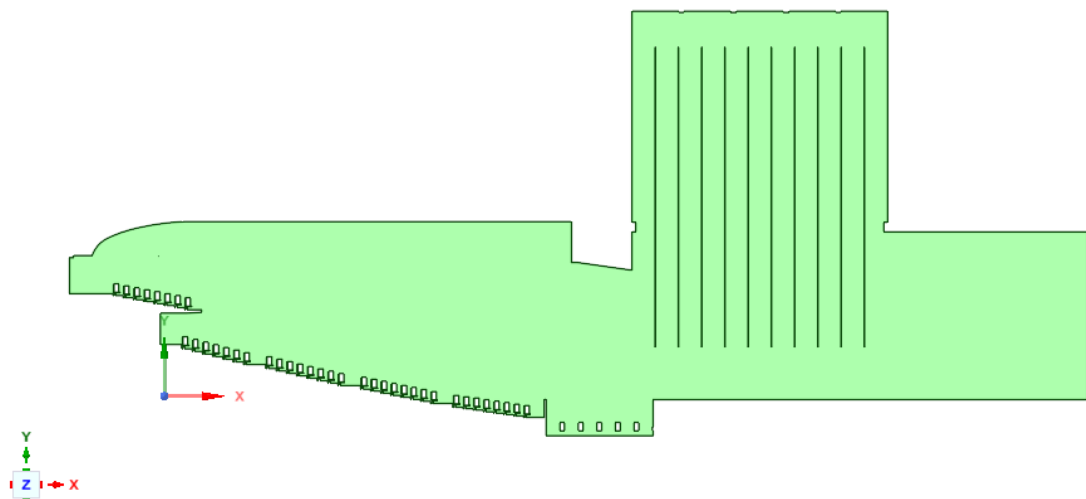
Questa condizione è di particolare interesse in quanto la presenza di questi teli, seppur sottili, può condizionare le modalità con cui l'aria circola all'interno dell'ambiente.

I teli disposti in serie, infatti, potrebbero in un certo senso "canalizzare" l'aria immessa dalla sommità della torre scenica, che troverebbe delle vie preferenziali nello spazio compreso tra un telo e quello successivo, raggiungendo il palco non più come un getto immesso a quasi 30 metri più in alto, che ha avuto modo di diffondersi, ma come una corrente concentrata e convogliata quasi puntualmente sul palcoscenico.

- **La definizione della geometria**

Si procede dunque assumendo la sezione già precedentemente considerata al caso 5), con spettatori e sedute, con l'orchestra presente nella fossa, cui viene aggiunta la rappresentazione dei teli di scena.

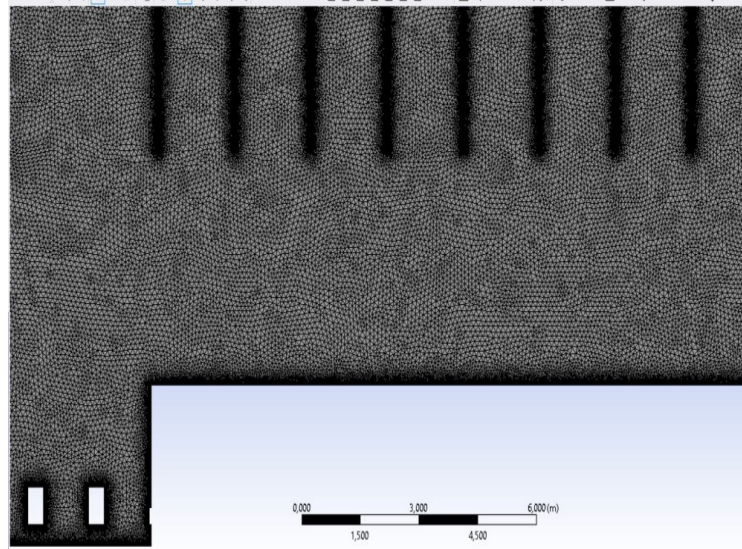
Nonostante le possibili configurazioni delle scene siano moltissime, essendo disponibili una trentina di alloggiamenti, si considera una situazione "standard" che comprenda dieci teli di scena, modellati come dei semplici rettangoli di 4 mm di spessore. Per semplicità tali elementi sono stati posti equidistanti dalle pareti, ad intervalli regolari.



- **La discretizzazione**

Questa nuova geometria così realizzata, appare sin da subito come molto più complessa rispetto alle precedenti, soprattutto per quanto riguarda l'onere di calcolo per la realizzazione delle *mesh*.

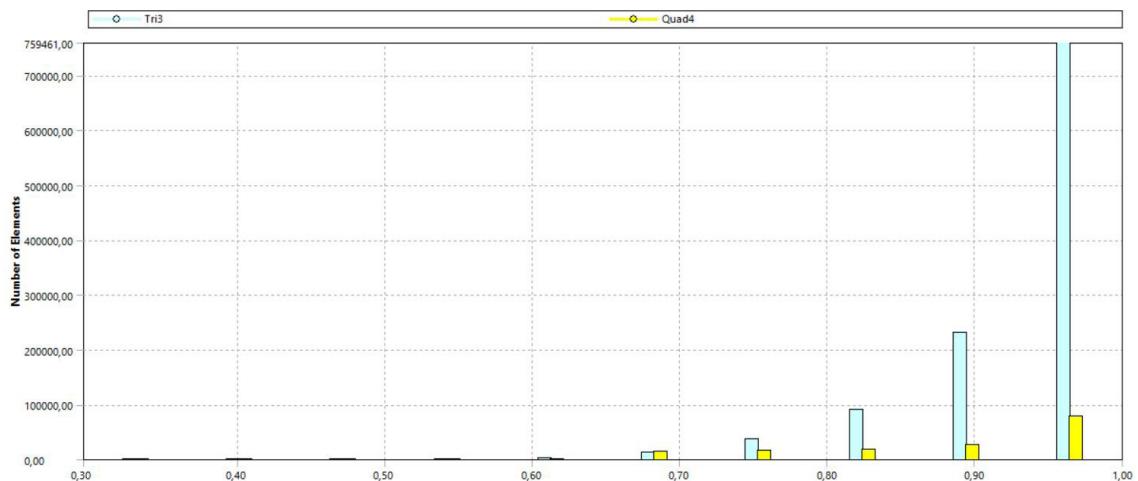
Avendo infatti stabilito che tutti i modelli bidimensionali realizzati, dovessero essere realizzati con gli stessi criteri, e dunque di mantenere inalterate le dimensioni degli elementi, pari a 0.1 per le celle centrali e 0.01 per quelle prossime alla frontiera e alle sezioni di interesse, il modello in questo caso ha visto crescere di molto il numero degli elementi e dunque tempi e complessità dell'analisi.

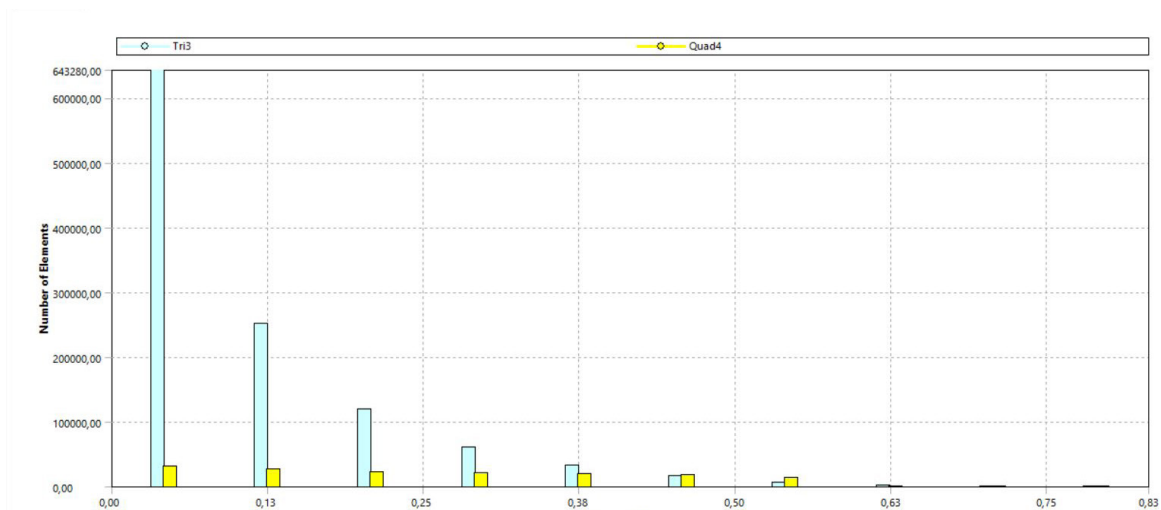


La *mesh non strutturata* così ottenuta presenta tali caratteristiche:

Elementi	1280184
Nodi di Controllo	756995

Il controllo di qualità della *mesh* appare ancora una volta soddisfatto, come è possibile rilevare sia dall'istogramma relativo all'ortogonalità, sia da quello della *skewness*.





- **La definizione del modello fisico**

Il modello fisico assunto, ancora una volta, si conserva inalterato rispetto ai casi già analizzati: un modello viscoso associato ad un modello di turbolenza k-ε e una funzione di parete *standard*.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, si decide di rendere anche questo modello confrontabile con i precedenti, mantenendo le stesse già considerate.

A partire da questa simulazione si è deciso infine di provare a modificare le condizioni al contorno per quanto riguarda la temperatura di immissione dell'aria.

Finora infatti essa è stata sempre definita pari a 288 K, come da dati di funzionamento dell'impianto forniti dalla *Fondazione Teatro Carlo Felice*, tuttavia a fini didattici, si esegue una simulazione con temperatura di immissione pari a 293 K (20 °C), al fine di valutare quanto questo dato influenzi i risultati finali.

Così facendo si ottengono gli andamenti di temperatura e velocità dell'aria.

3.3 Il modello 3D

Una volta raccolti i dati relativi ai diversi scenari che possono interessare la geometria bidimensionale, appare evidente la necessità di procedere con la realizzazione di un modello tridimensionale.

I diversi fenomeni che fino a questo momento sono stati rilevabili, infatti, risultano apprezzabili solo qualitativamente nelle due dimensioni ed appare immediato come in realtà si tratti di flussi e dinamiche che si sviluppano nello spazio e che quindi solo attraverso la modellazione delle tre dimensioni sia possibile comprendere ciò che accade all'interno della sala principale del teatro.

Questo consentirà inoltre di superare alcune ipotesi semplificative introdotte proprio per rendere rappresentativa l'analisi 2D, ma che descrivevano solo con un alto grado di approssimazione i fenomeni reali.

- **La definizione della geometria**

Per la realizzazione della simulazione tridimensionale, si è partiti nuovamente dagli elaborati tecnici bidimensionali della *Fondazione Teatro Carlo Felice* che, successivamente sono stati integrati con sopralluoghi *in situ* per poter cogliere meglio lo sviluppo delle volumetrie.

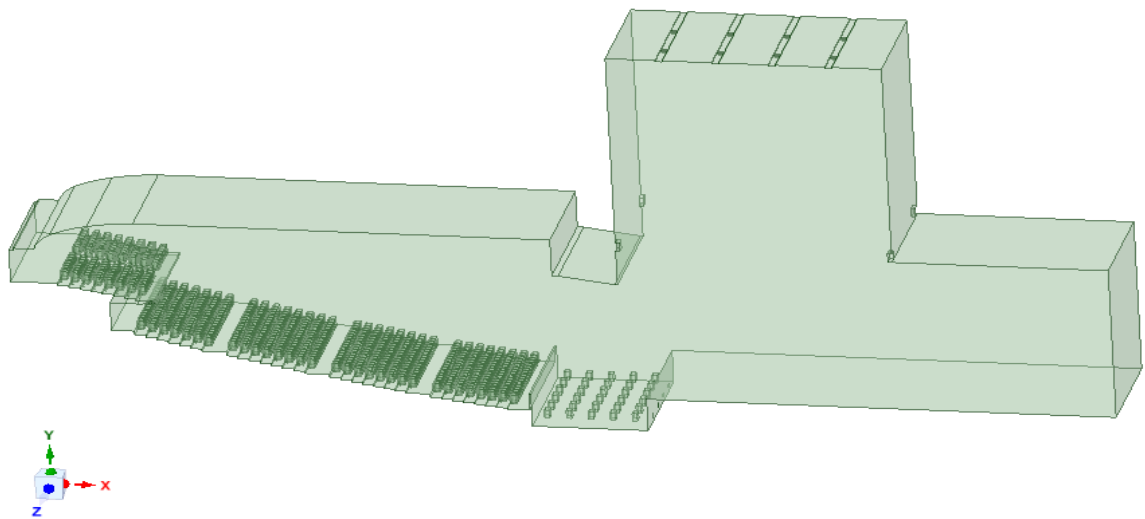
Per ridurre gli oneri di calcolo, tuttavia, si è deciso di non realizzare l'intero volume della sala principale, ma di assumerne solo la sezione centrale, di profondità pari a 10 metri, così da cogliere le dinamiche principali, ritenute di per sé rappresentative per l'intera sala, senza tuttavia tener conto di quello che succede in prossimità delle pareti laterali.

La geometria è stata quindi modellata con *Autocad 3D* e successivamente importata su *Spaceclaim*.

Ancora una volta si è deciso di rappresentare i principali elementi architettonici, le bocchette e dei diffusori del sistema di ventilazione, e, come elementi di arredo, le sole poltrone per il pubblico in sala, mantenendo dunque un grado di schematizzazione che rimanesse confrontabile con quello delle analisi bidimensionali precedenti.

Per quanto i blocchi rappresentativi delle persone, si sono mantenute le dimensioni utilizzate nel modello bidimensionale e, per quanto riguarda la terza dimensione, si è scelto uno sviluppo di 55 cm di profondità.

Ancora una volta si è simulata una condizione di platea al completo, mentre per quanto riguarda gli orchestrali sono stati rappresentati in una configurazione di cinque file di sei elementi ciascuna, per un totale di trenta persone.



- **La discretizzazione**

A partire da tale geometria si può procedere con la realizzazione della *mesh*.

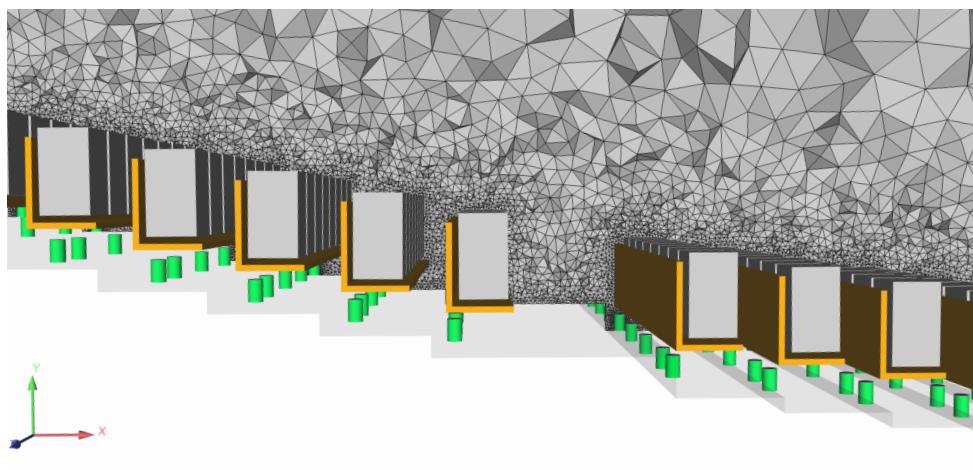
La complessità del modello tridimensionale richiede con ancora maggiore necessità rispetto ai casi precedenti la realizzazione di una *mesh* costituita prevalentemente da elementi triangolari e, dunque, *non strutturata*.

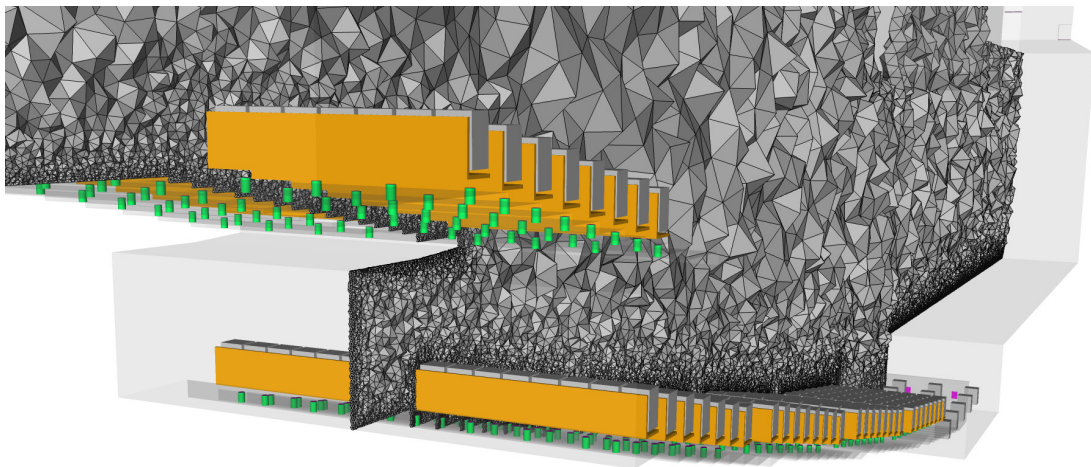
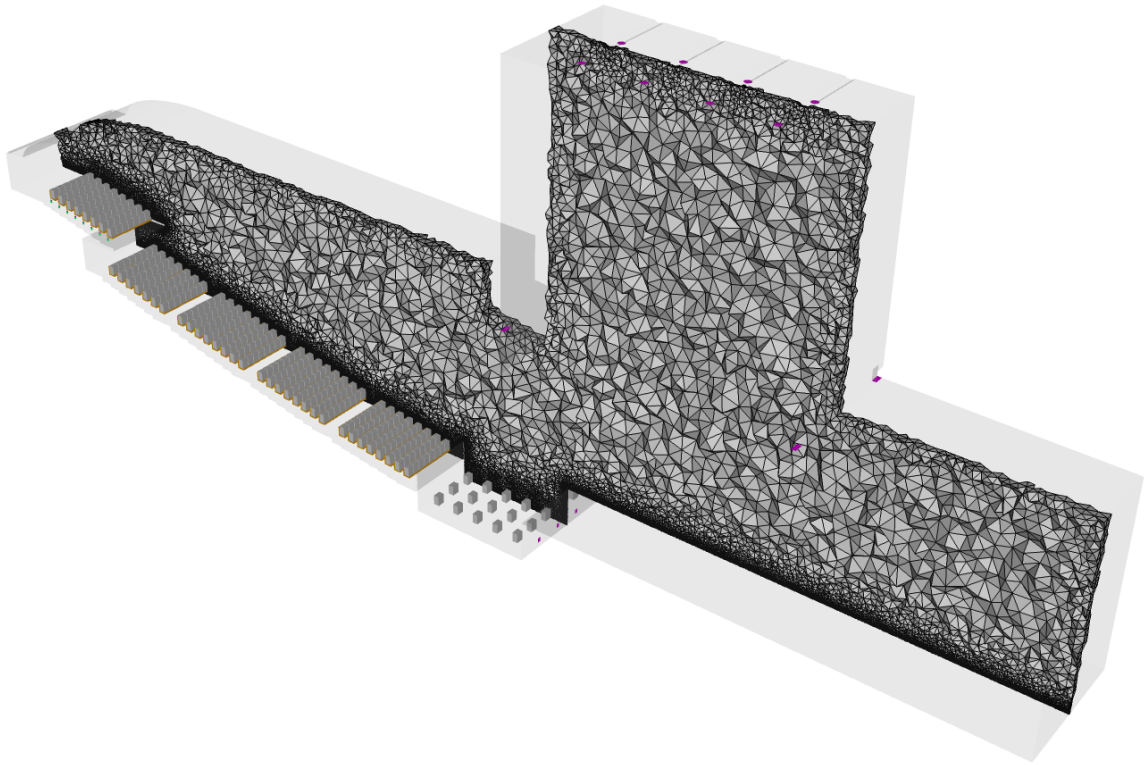
In questo caso le dimensioni delle celle variano in modo molto più sensibile assecondando le differenti esigenze di grado di dettaglio mutevoli in un modello così articolato.

Si considera come dimensione media degli elementi nella zona centrale della sala, lontano dai margini della geometria, 50 centimetri di lato, dimensione che via via diminuisce avvicinandosi al contorno fino ad assumere il valore minimo di 1 centimetro in prossimità dei diffusori al di sotto delle poltrone.

Nella totalità la meshatura produce 70 milioni di celle.

Come appare evidente sin da subito si tratta di un modello estremamente più complesso rispetto ai casi precedenti, tale da far accrescere l'onere di calcolo da qualche ora a cinque giornate.





- **La definizione del modello fisico**

Per quanto riguarda il modello fisico, si assume lo stesso adottato nei casi bidimensionali: un modello viscoso associato ad un modello di turbolenza k-ε e una funzione di parete standard.

Anche per quanto concerne le condizioni al contorno, si mantengono le stesse assunte precedentemente e ribadite di seguito per completezza:

- la portata d'ingresso relativa ai singoli diffusori come da dati di progettazione esecutiva dell'impianto e successive relazioni tecniche è definita pari a 0,02 kg/s per la platea, si assume che i diffusori in analisi abbiano una portata pari a 60 m³/s;
- la portata di inlet delle bocchette presenti sulla sommità della torre scenica è pari a 1500 m³/h/cad;
- la portata di aria immessa della fossa dell'orchestra è pari a 3600 m³/h;
- la pressione della sala è stata assunta come costante e pari al valore di 1 atm, anche se in accordo con la normativa antincendio, la sala è sicuramente contraddistinta da una sovrappressione che facilita l'emissione di eventuale fumo, si tratta dunque di un'iniziale semplificazione;
- infine la temperatura di immissione viene inserita a 15°C, 288 K, come da valore oggi fornito dall'UTA;
- per quanto concerne le condizioni al contorno trattandosi ora di un volume chiuso, con due nuove pareti che ne confinano i lati, si assume che, ai fini di modellare un dominio finito, la portata e le condizioni dell'aria che entrano da un lato siano le stesse che escono dall'altro;
- le persone anche in questo caso sono rappresentate da una sorgente di calore di valore pari a 60 W/m².

- **L'elaborazione della soluzione**

Avendo così impostato l'analisi tridimensionale, dopo aver eseguito le iterazioni adeguate, si giunge ad ottenere dei risultati coerenti con quelli estrapolati dall'analisi bidimensionale corrispondente.

Si processano poi tali risultati con il software Ensignht. In particolare per avere una rappresentazione adeguata dei fenomeni tridimensionali, si assumono delle sezioni rappresentative situate in diversi punti significativi dello spazio tridimensionale, sette in totale.

Per tali sezioni si ottengono le isolinee di andamento di temperatura e velocità dell'aria.

In corrispondenza della sezione di mezzeria si estrapolano anche i dati relativi ai vettori di velocità dell'aria rappresentativi di zone del volume che si ritengono maggiormente significative e dove nella situazione reale sono stati rilevati i principali problemi di comfort. Inoltre ai fini di una migliore conoscenza delle dinamiche in atto attraverso le linee di flusso dell'aria si possono rilevare i vortici presenti.

Capitolo 3 | Riferimenti note

¹ El-Hariry G., Khalil E.E., Abdel-Samee W., 2008, Numerical investigations of thermal comfort and indoor air quality inside air conditioned amphitheatre, *Indoor Air* 2008, 17-22 August 2008, Copenhagen, Denmark

² Mateus N., Carrilho Da Graca G., 2014, Thermal and airflow simulation of the Gulbenkian Great Hall, 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28

³ Jing C.S., 2018, Numerical investigation of indoor environmental quality and ventilation performance in a university lecture theatre

4. Risultati

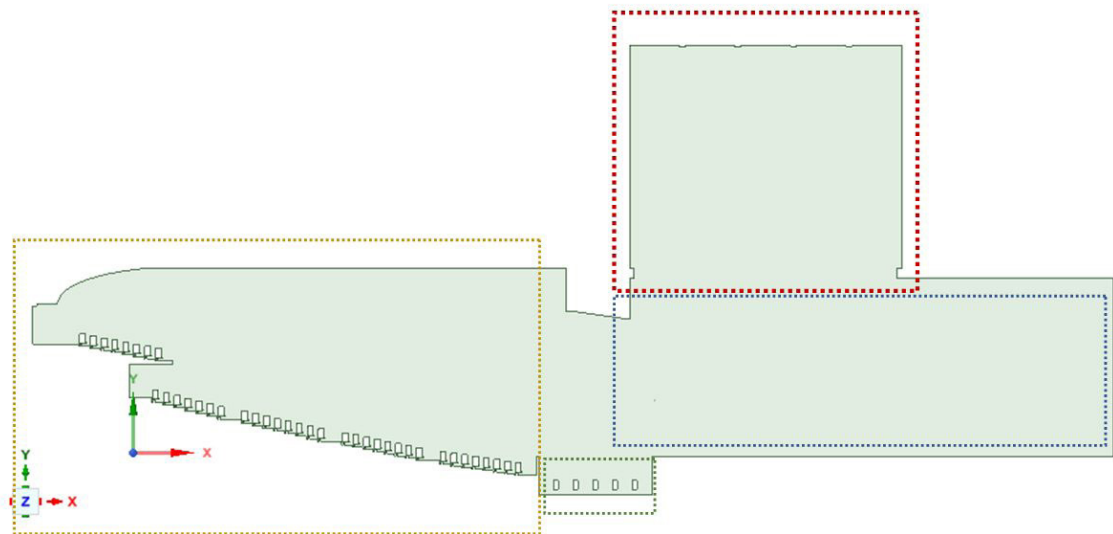
Definite così i modelli bidimensionali e tridimensionali, avendo svolto le analisi con le caratteristiche precedentemente enunciate, è necessario ora passare in rassegna caso per caso i risultati ottenuti in termini di temperatura e velocità dell'aria.

Questo consentirà di mettere a fuoco i fenomeni di natura fluidodinamica che interessano la sala e la zona della torre al variare delle caratteristiche del modello realizzato.

Pertanto, nell'analisi dei risultati, si decide di prendere ad esempio quattro zone rappresentative della sezione del teatro:

- la sala-----;
- la torre scenica-----;
- la zona palco-----;
- la fossa dell'orchestra-----.

Questi saranno i “punti notevoli” che consentiranno di monitorare le variazioni delle caratteristiche dell'aria nei diversi casi presi in esame.

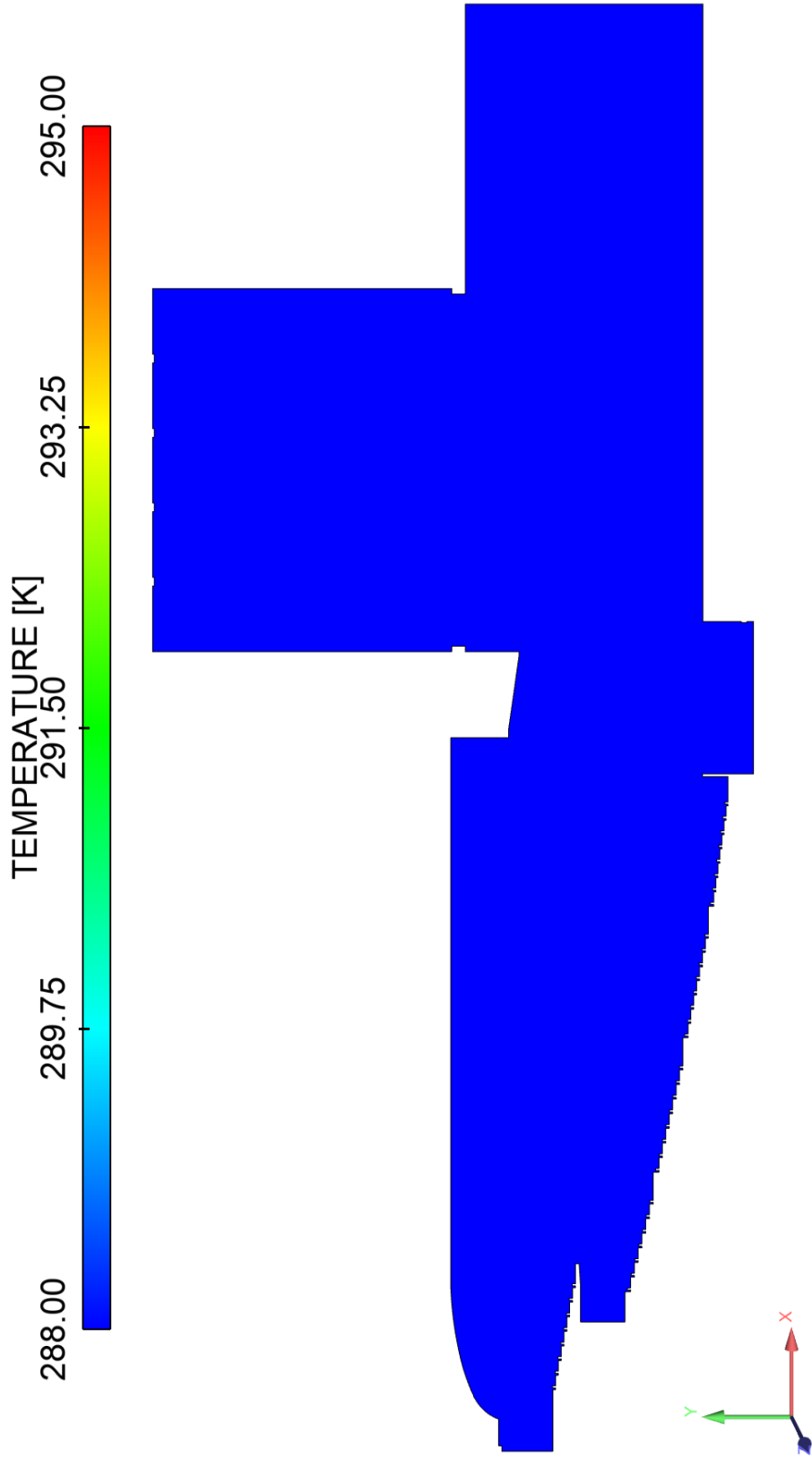


4.1 Caso 1

Per quanto riguarda il primo caso la geometria in analisi è la più semplice: viene rappresentato solo il profilo dell'architettura sezionata e dei diffusori e delle bocchette che consentono la ventilazione all'interno della volumetria del teatro.

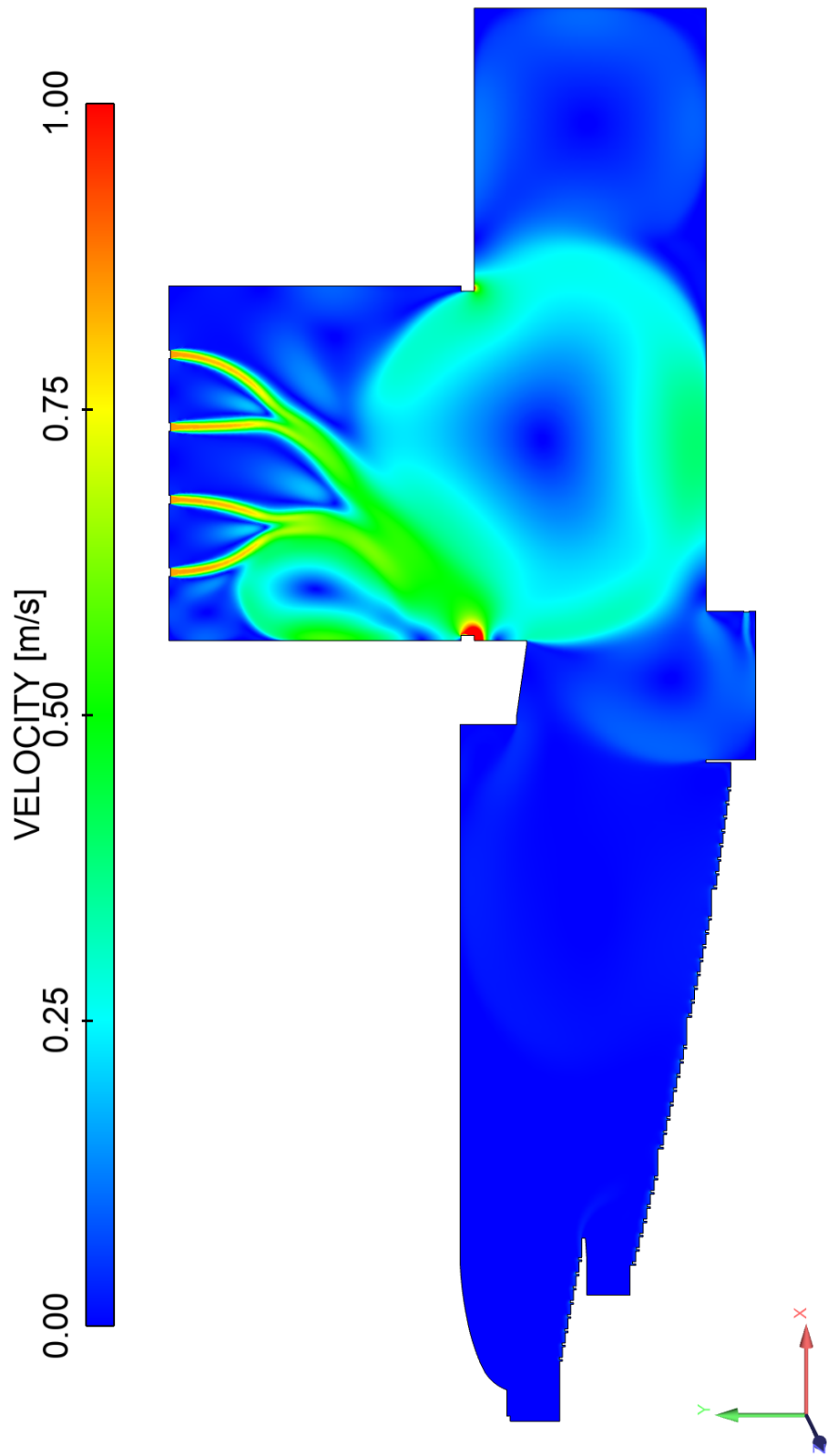
Non figurano elementi di arredo, né persone che occupino il teatro. Si tratta dunque di una forte approssimazione che, tuttavia, consente in prima battuta di visualizzare quali percorsi sono seguiti dal flusso dell'aria.

I risultati ottenuti in termini di temperatura sono quelli che prevedibilmente potevano essere immaginati: avendo cioè imposto una condizione di pareti adiabatiche, non essendoci dunque dispersione di calore, ma avendo anche scelto una configurazione iniziale senza fonti di calore interne, quali persone o radiatori, nel tempo la sala all'interno della quale viene immessa aria alla temperatura di 288 K finirà per raggiungere uniformemente quella temperatura in tutta la sezione.



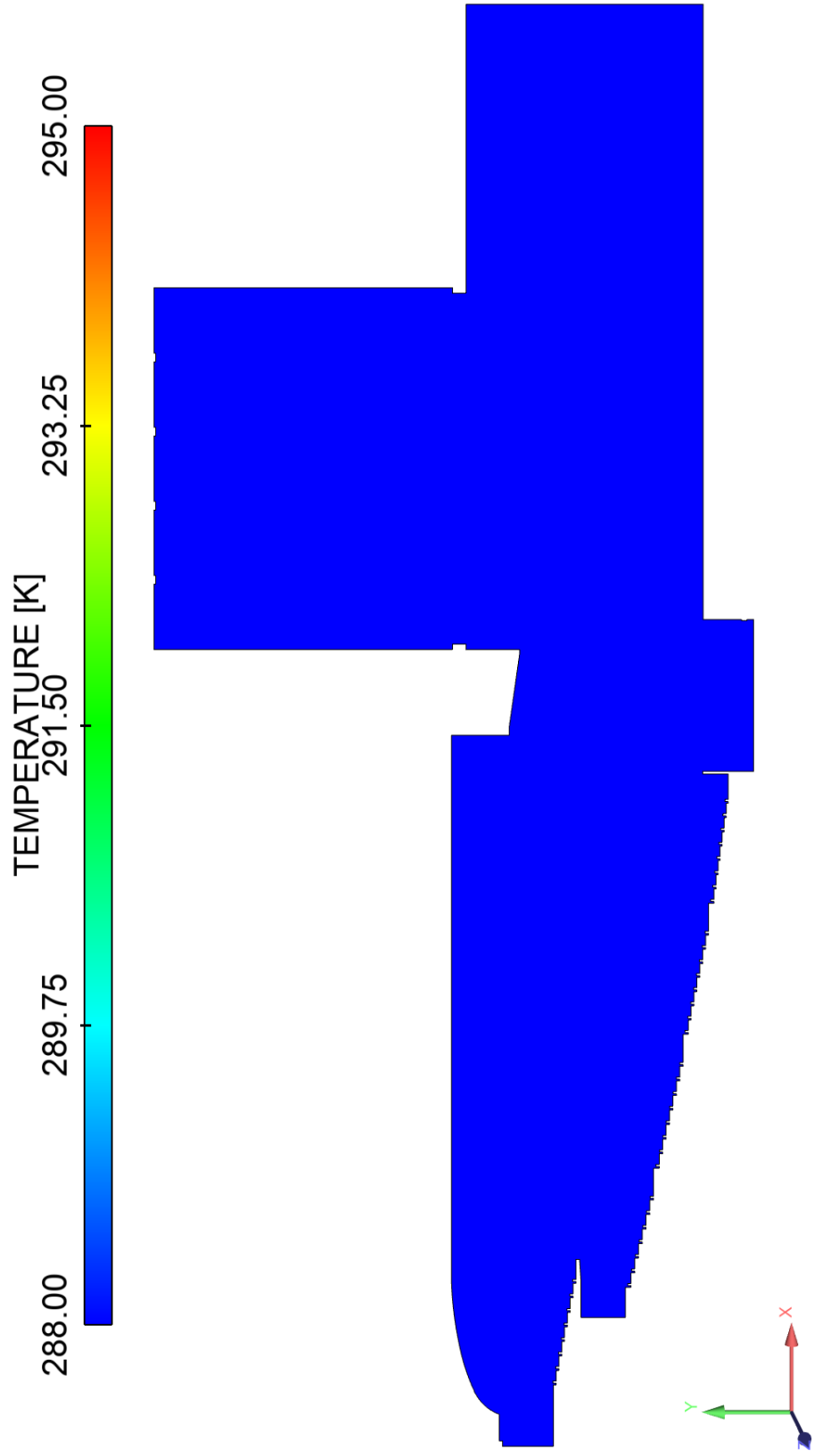
Per quanto riguarda la velocità dell'aria, invece, si ottengono dati decisamente meno prevedibili: si rileva infatti che all'interno della sala l'aria rimane perlopiù statica, si trovano infatti valori di velocità prossimi allo zero, ma mano a mano che ci si avvicina alla zona del palco le velocità aumentano. In particolar modo il getto delle bocchette di inlet della torre, in corrispondenza delle quali si raggiungono le maggiori velocità, fino ad 1 m/s, viene in parte direttamente richiamato dalle bocchette di ripresa sottostanti, tendendo maggiormente verso sinistra a causa di fenomeni di instabilità del getto, in parte innesca invece un ricircolo nella zona del palco e nel vano retrostante che assume velocità abbastanza significative tra gli 0.25 e gli 0.50 m/s.

Infine un ulteriore vortice interessa la zona della fossa dell'orchestra, contraddistinto tuttavia da velocità inferiori.



Come è stato precedentemente descritto, tuttavia, si è deciso di realizzare l'analisi relativa al primo caso anche impiegando portate equivalenti per avere un termine di paragone potendo disporre di risultati ottenuti in maniera più rigorosa, e cioè non utilizzando le portate relative ai diversi dispositivi nella loro tridimensionalità, ma utilizzando delle portate "adimensionalizzate", equivalenti appunto, considerate cioè in riferimento ad un metro di profondità.

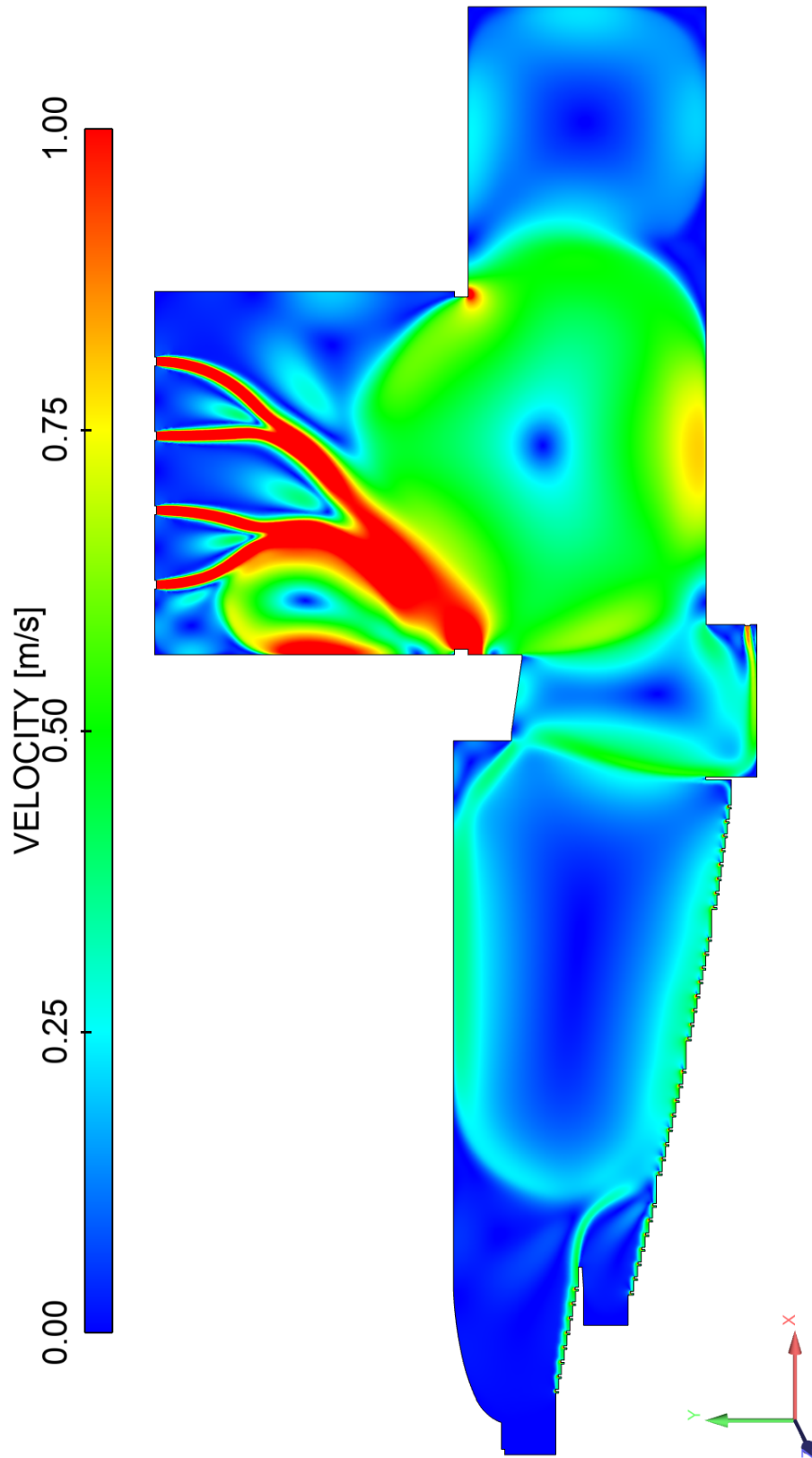
Questo ha portato da un lato a confermare le considerazioni eseguite in precedenza per quanto riguarda i risultati inerenti all'andamento della temperatura, mentre per quanto concerne l'andamento della velocità dell'aria si è potuto rilevare un potenziamento sostanziale dei fenomeni descritti precedentemente.



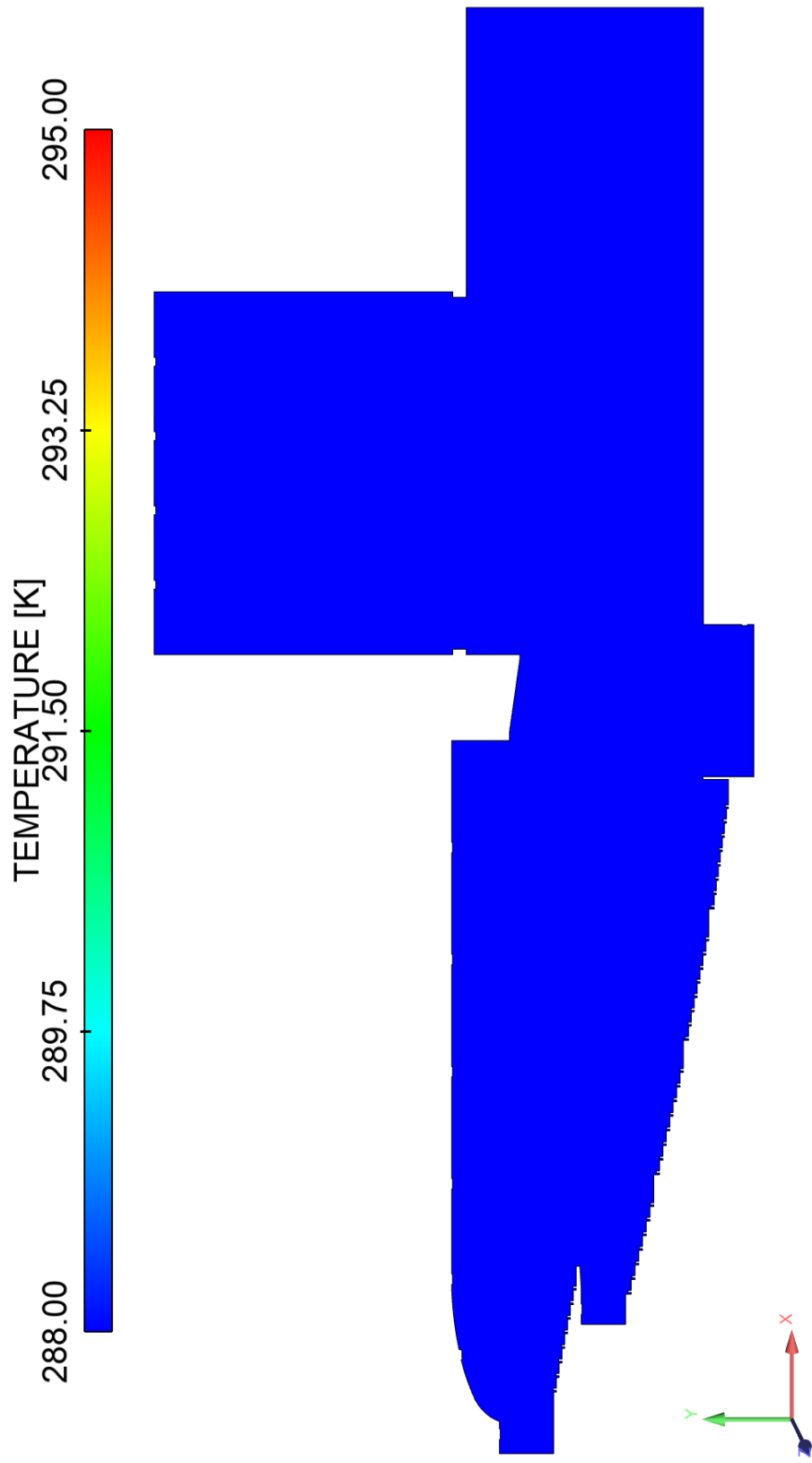
La leggera crescita dei valori di velocità nella sala avvicinandosi ad palco è invece ora leggibile chiaramente come un ulteriore fenomeno di ricircolo che va ad investire in maniera sensibile la quasi totalità della sala. Molto più marcati risultano anche i fenomeni di ricircolo della zona della fossa e della parte posteriore del palco.

All'interfaccia tra sala, palco e fossa la velocità raggiunge valori prossimi a 0.5-0.6 m/s.

Infine appare ancora più evidente l'instabilità del flusso d'aria proveniente dalla sommità della torre scenica che tende verso sinistra, richiamata dalla bocchetta di ripresa, ma innescando e alimentando il vortice in corrispondenza della zona centrale del palcoscenico dove le velocità variano tra gli 0.6 m/s, fino a raggiungere, nella parte più prossima alle bocchette di immissione il valore di 1 m/s.



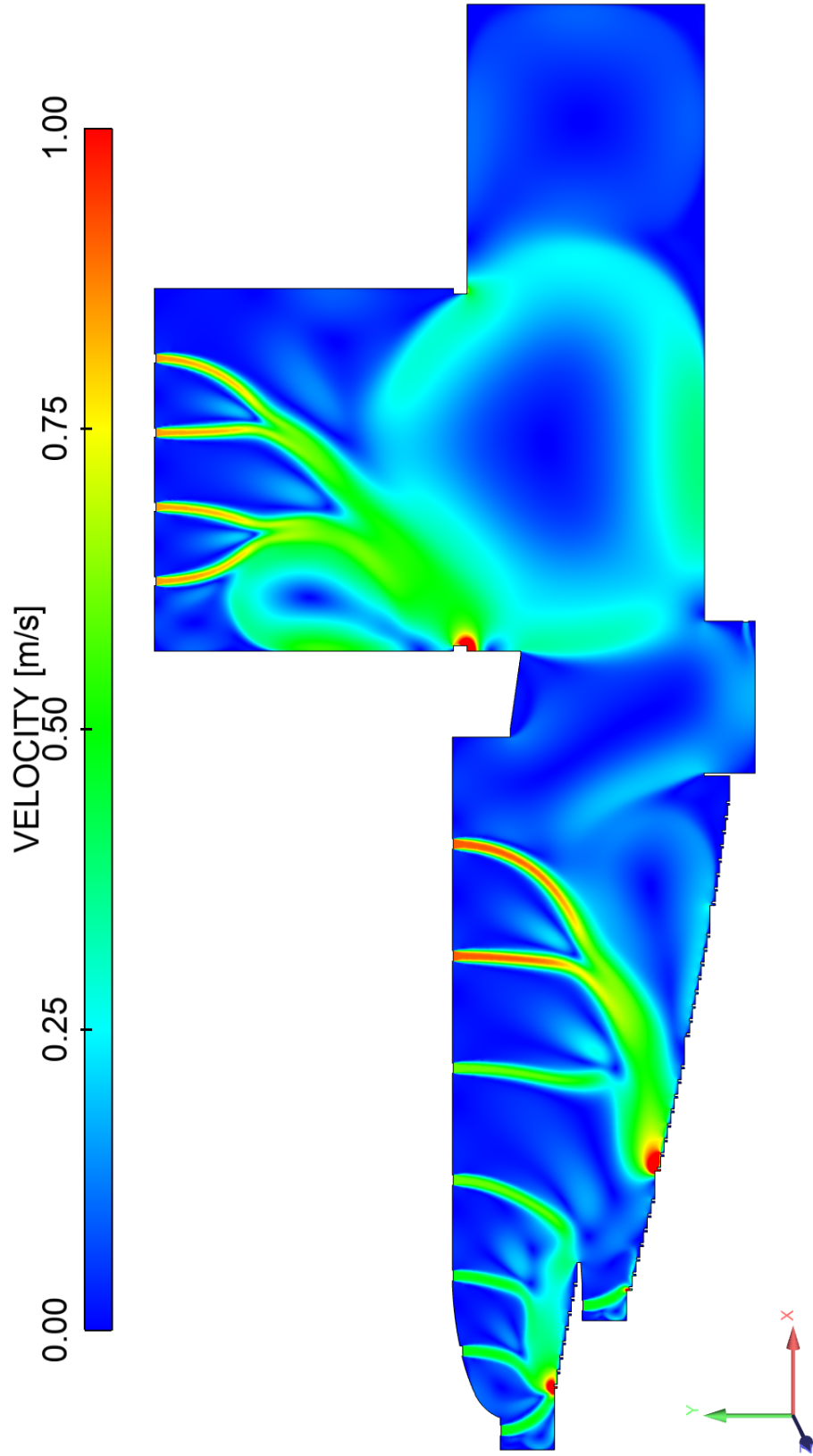
L'ulteriore termine di paragone che si è deciso di introdurre è quello della medesima sezione architettonica all'interno della quale però venisse alterato il sistema di ventilazione della sala, sostituendo l'immissione dell'aria ad opera dei diffusori a piede di poltrona, con un più usuale sistema di inlet a soffitto.



Questa ulteriore variazione ha confermato ulteriormente le considerazioni in termini di temperatura e ha consentito soprattutto di comprendere come i fenomeni che interessino il palco, la torre scenica e la fossa fossero sostanzialmente autonomi rispetto al sistema di ventilazione dell'aria a parità di portate.

E' rilevabile infatti in questo caso una maggiore interazione tra i volumi d'aria della sala e quelli di torre scenica e fossa dell'orchestra: in quest'ultima zona soprattutto il valore della velocità e la massa d'aria coinvolta risultano maggiormente significative; tuttavia la torre e il palcoscenico presentano nuovamente fenomeni analoghi a quelli forniti in occasione della prima simulazione.

Indubbiamente cambia invece la dinamica dell'aria all'interno della sala, dove la mandata a soffitto e la ripresa in corrispondenza delle alzate dei gradini, attivano meccanismi di ricircolo locali anche molto importanti, soprattutto a livello della pavimentazione, dove si arrivano a raggiungere valori fino ad 1 m/s, evidenziando dunque un forte grado di problematicità.



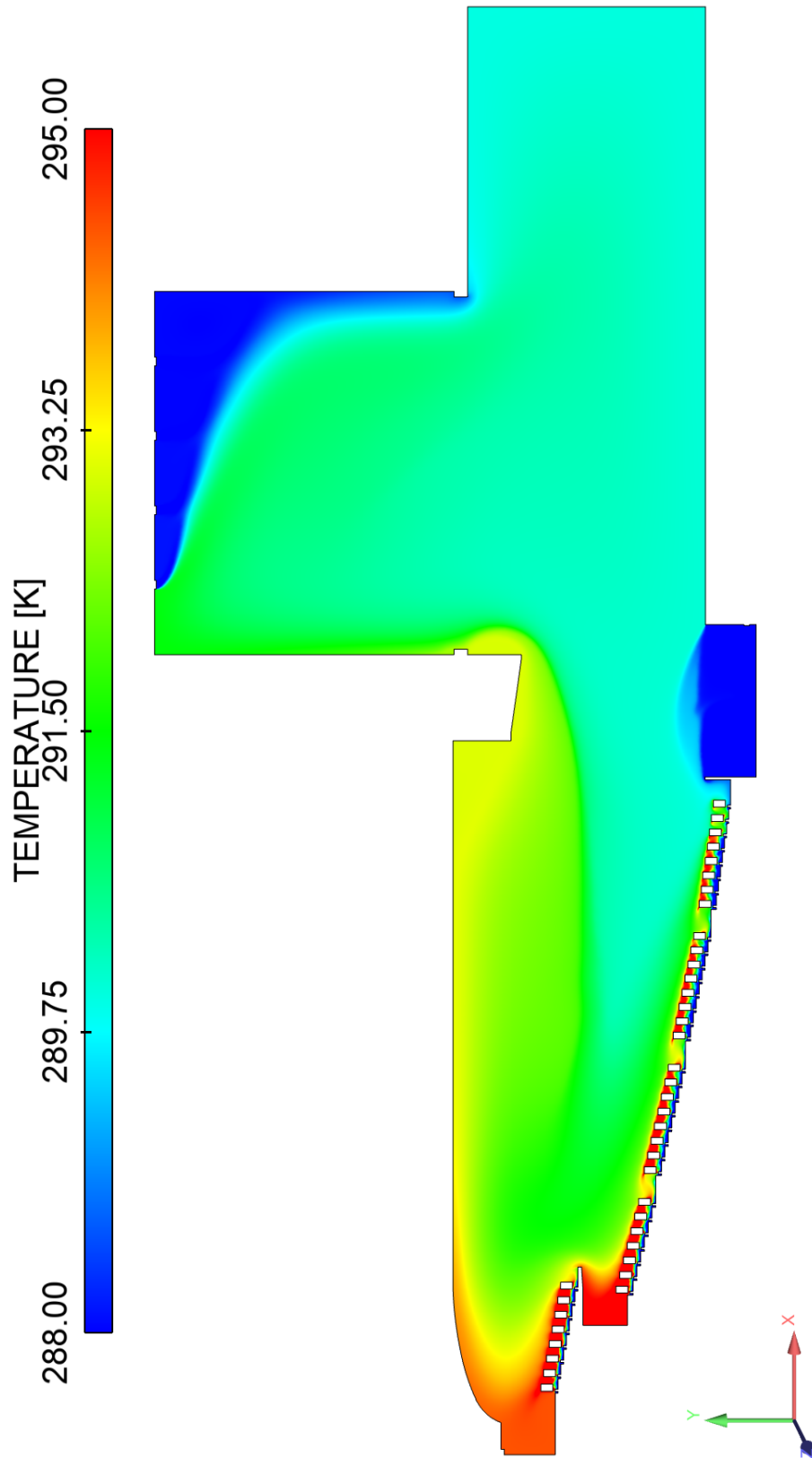
4.2 Caso 2

Il secondo caso, come già sottolineato, differisce dal primo per la presenza degli spettatori: viene qui simulata una situazione di sala al completo.

Questo fattore risulta determinante per i risultati che si ottengono, in quanto avendo inserito delle sorgenti di calore, ad ogni blocco rappresentativo di una persona (70 cm x 40 cm), si assegna un valore di 60 W/m^2 , si ottengono importanti ricadute sia in termini di temperatura che in termini di velocità dell'aria.

La temperatura infatti non si conserva più costante, ma varia a seconda delle zone, in particolare:

- la sala risulta la zona più calda: si raggiungono i 295 K tra le file, dove la presenza umana risulta più densa e nella parte più in alto della platea dove l'altezza libera si riduce notevolmente per la presenza della galleria e l'aria calda tende ad accumularsi; una situazione molto simile avviene anche in nella parte più alta della galleria; più in alto rispetto agli spettatori la temperatura oscilla tra i 291 K e i 292 K, mentre in prossimità del palco si rilevano valori ulteriormente più bassi attorno ai 289 K;
- la fossa, al contrario rimane una sorta di "sacca" di aria fredda a 288 K che sembra non essere influenzata dai maggiori valori di sala e torre scenica;
- il palcoscenico, invece si attesta attorno ai 290 K, risentendo positivamente della presenza degli spettatori;
- infine la torre è interessata da valori maggiori di temperatura in prossimità dell'interfaccia con la sala mentre nell'angolo opposto rimane una zona di aria ferma alla temperatura di immissione.

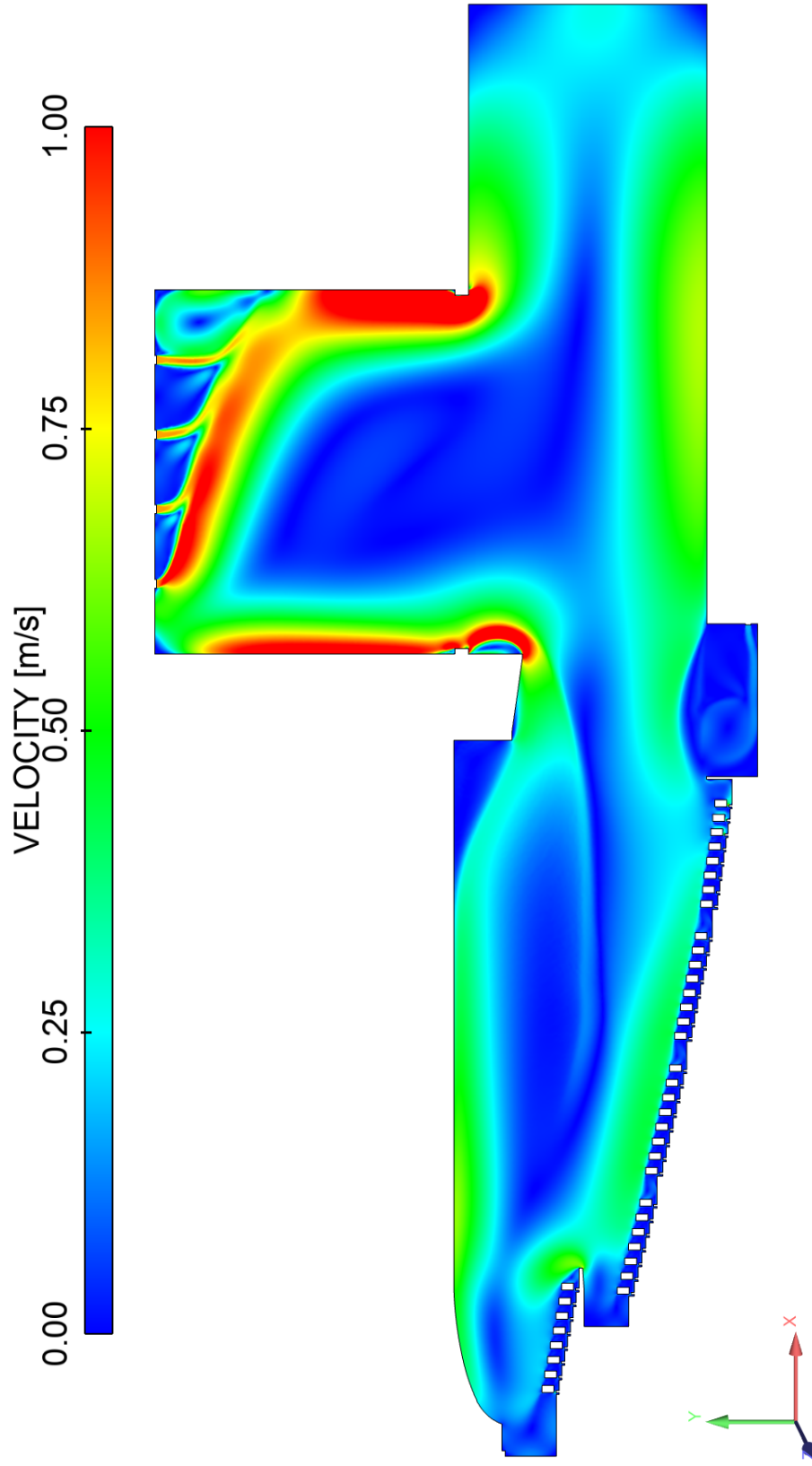


Considerando invece gli effetti sulla velocità dell'aria, le variazioni sono ancora più sensibili.

Le masse d'aria della sala, della torre e del palcoscenico sembrano ora interagire più direttamente le une con le altre. Un unico flusso d'aria corre tutto attorno al perimetro della sezione con velocità anche elevate che raggiungono gli 0.75 m/s. Ancora una volta però le velocità maggiori sono quelle in corrispondenza dell'immissione dell'aria nella torre, dove tuttavia si evidenzia un fenomeno opposto a quanto avveniva in precedenza.

Il flusso, di per sé instabile, di aria immessa nella torre, in conseguenza del riscaldamento generale del grande volume d'aria della sala, viene in un certo senso “spinto” verso il lato destro della torre, prima estraneo a tali fenomeni. In questo angolo si concentra inoltre un piccolo vortice di aria fredda che non interagisce con il resto del volume.

La fossa dell'orchestra questa volta è doppiamente colpita da correnti di aria fredda: una che la lambisce superiormente con velocità maggiori, e un minore, seppur significativo ricircolo tutto interno al volume.



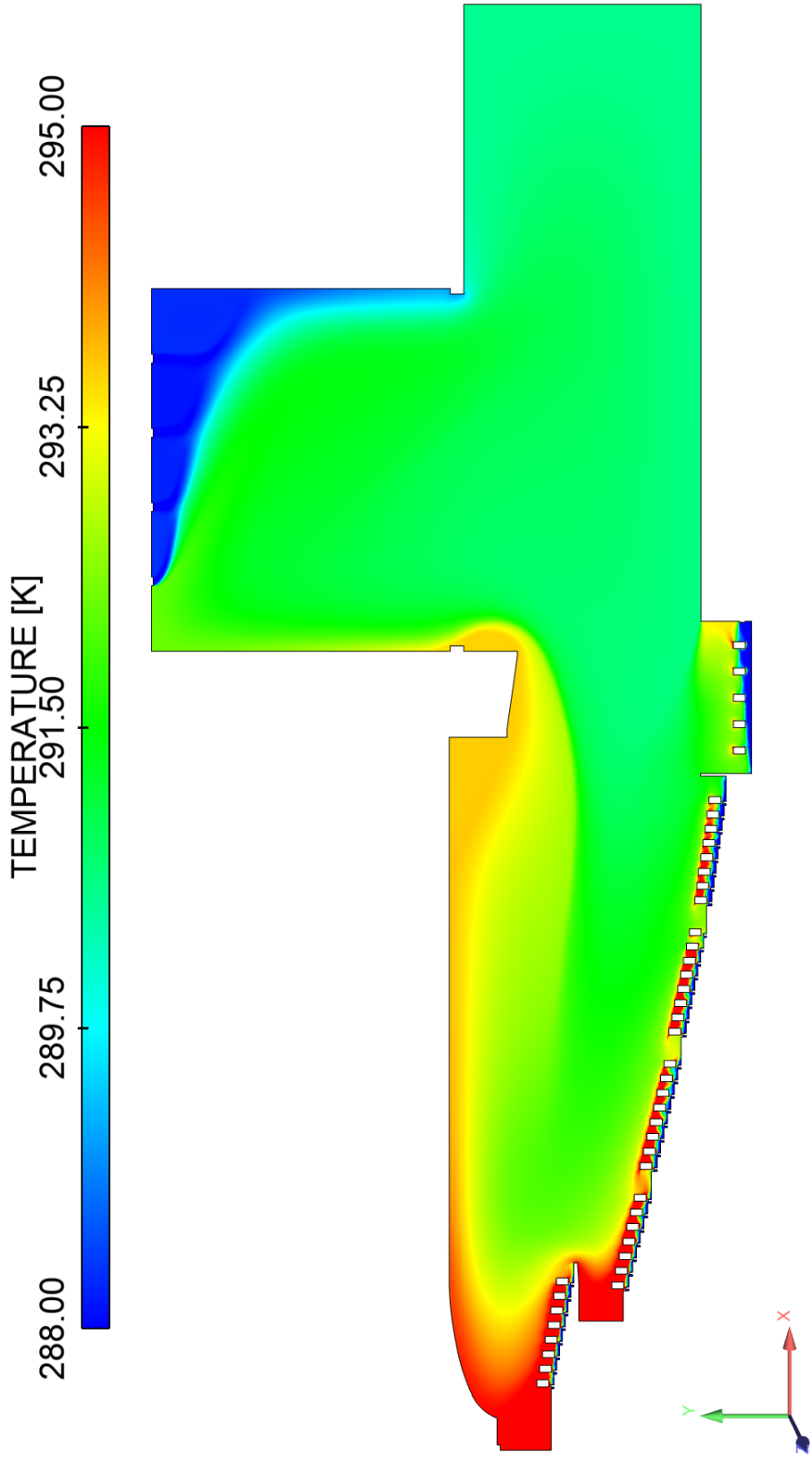
4.3 Caso 3

Il terzo caso presenta la stessa condizione di affollamento per quanto riguarda la sala, e quindi di fatto il “tutto esaurito”, le stesse caratteristiche della geometria e l’unica variazione che viene applicata è la presenza di alcuni orchestrali all’interno della fossa.

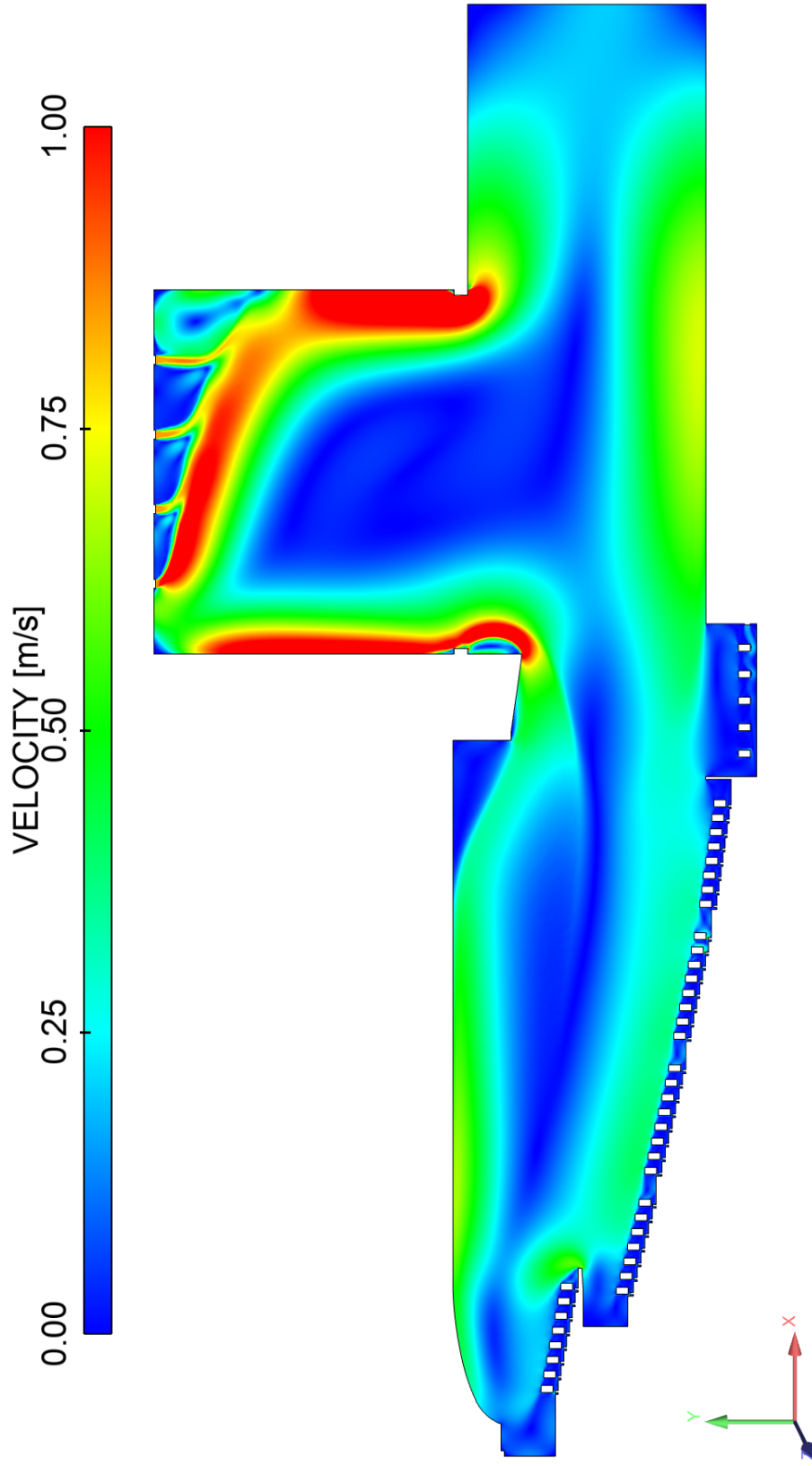
Si tratta ovviamente di una variazione minima che tuttavia consente di valutare separatamente l’effetto della presenza di una fonte di calore localizzata, data da cinque blocchi in questo caso, rappresentando una delle numerose configurazioni possibili per l’orchestra, su un volume d’aria ridotto che presentava peculiarità, rispetto al resto del volume, sia in termini di temperatura che di flussi d’aria.

Considerando dunque l’andamento della temperatura, si conserva pressochè inalterato sia nella sala, che in corrispondenza del palcoscenico e della torre.

La situazione varia tuttavia nella fossa, dove a causa dell’inserimento dei blocchi rappresentativi degli orchestrali, pur conservandosi una lama d’aria fredda, nel complesso la temperatura sale a valori tra i 292 K e i 293 K.



Anche per quanto riguarda i risultati relativi alla velocità essi non sembrano variare più di tanto, con l'eccezione della fossa in cui l'apporto di calore altera i vortici presenti al suo interno nella simulazione precedente rendendoli meno concentrati e definiti.



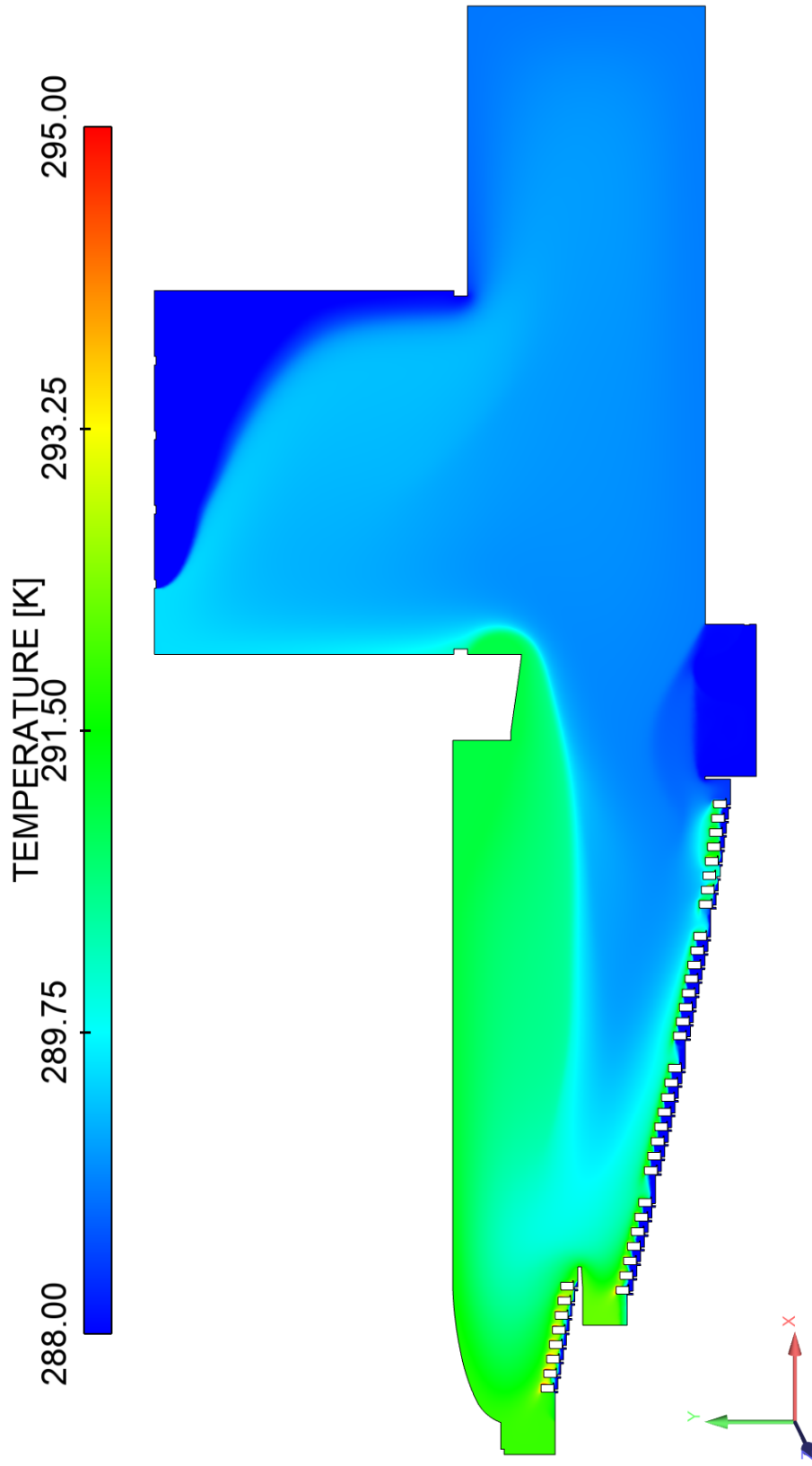
4.4 Caso 4

Questa simulazione rappresenta una variazione del caso 2), si fa cioè un passo indietro rispetto al caso 3) rimuovendo gli orchestrali, ma si procede invece per quanto riguarda la sala, inserendo le poltrone.

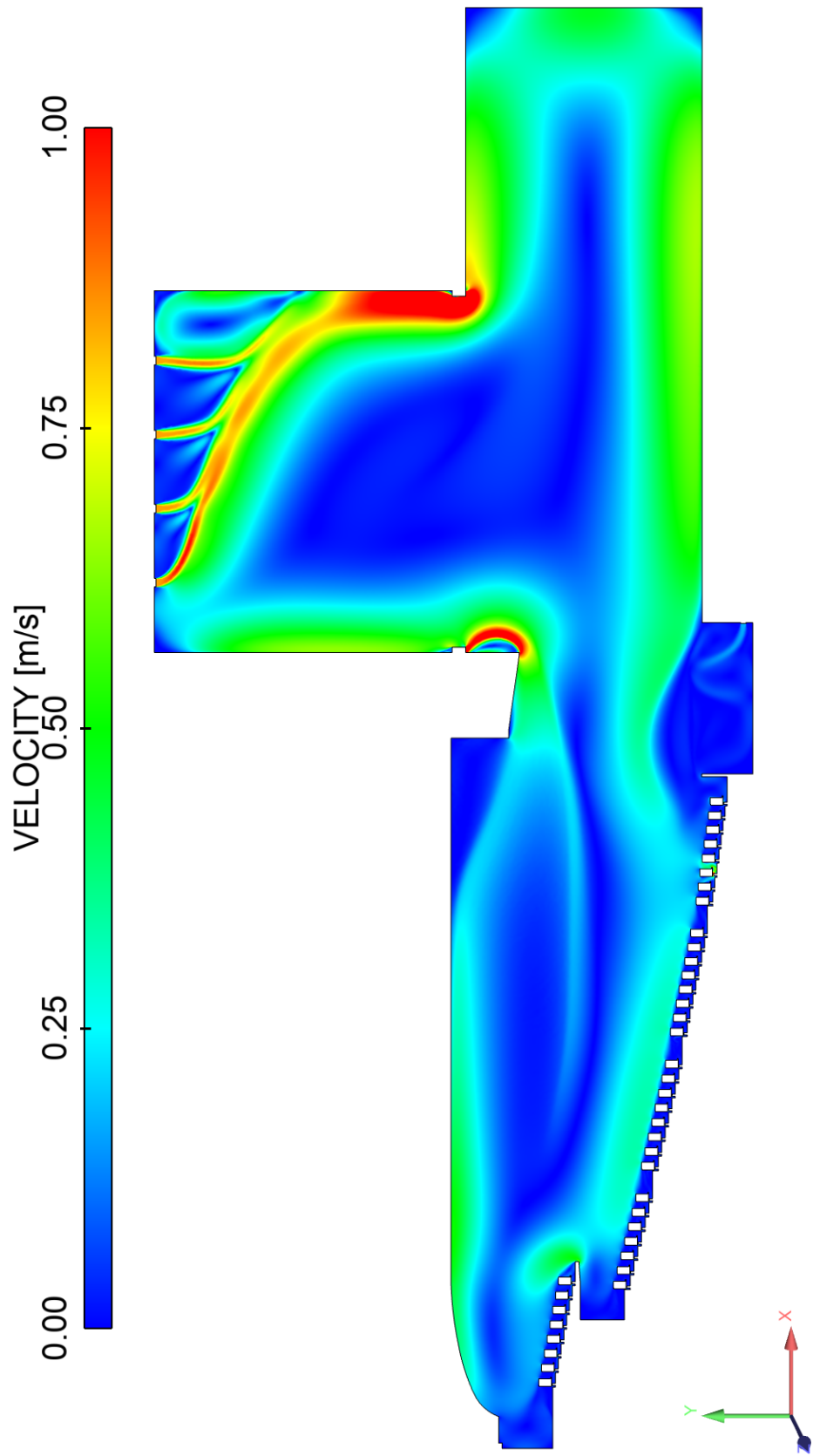
Questo consente di poter studiare più nel dettaglio quello che realmente accade all'aria immessa dai diffusori a piede di poltrona: appena immessa, infatti, l'aria incontra la barriera delle poltrone sovrastanti che, inevitabilmente, ne influenzano il flusso.

Il primo effetto che si rileva è quello diretto sull'andamento della temperatura. Dal punto di vista della simulazione, e in parte anche della situazione reale, la presenza delle poltrone scherma parte del calore disperso dagli spettatori, che dunque risultano meno "impattanti" dal punto di vista termico sulla sala e, indirettamente, sull'intera sezione.

L'andamento risulta quindi analogo ai casi precedenti ma "scalato" su temperature inferiori tra un massimo di 293 K e un minimo di 288 K.



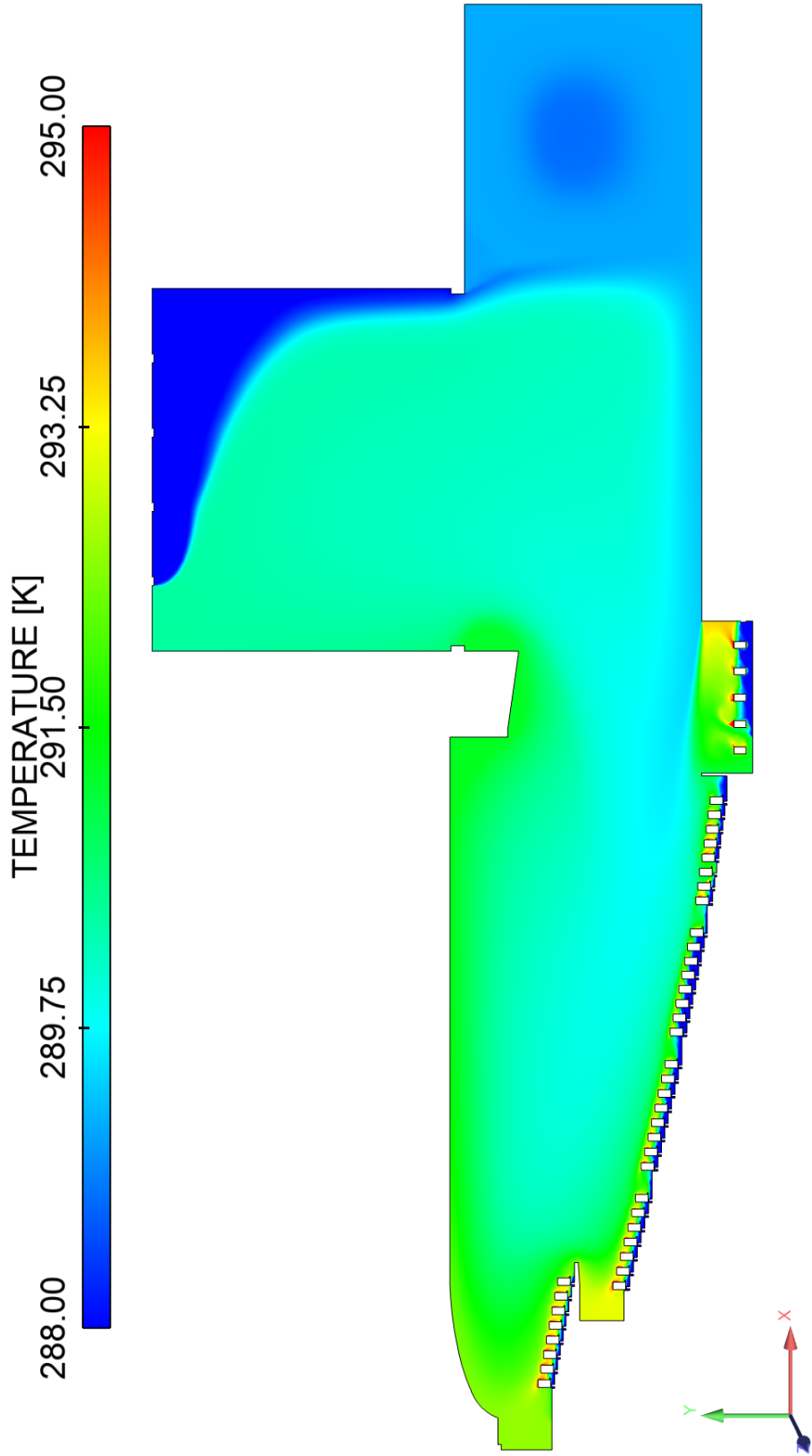
Considerando poi i risultati relativi alla velocità, essi coincidono nella quasi totalità a quelli del caso 2), con la sola differenza che le velocità risultano leggermente inferiori, seppur l'aria sia caratterizzata dallo stesso flusso, a causa delle minori temperature che si registrano che di conseguenza producono fenomeni convettivi minimamente meno marcati.



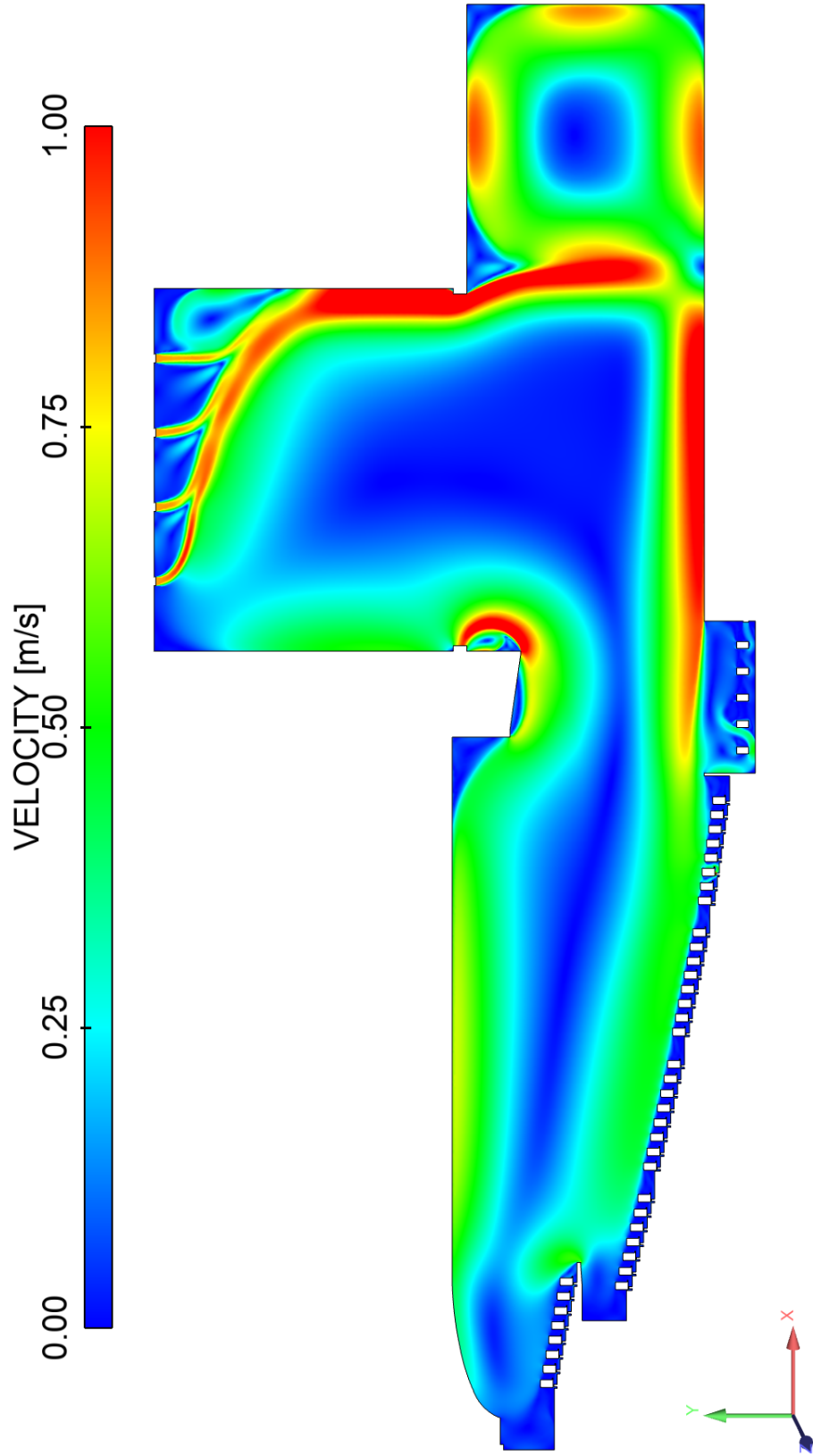
4.5 Caso 5

Analogamente a quanto fatto per passare dal caso 2) al caso 3), si procede in questo caso inserendo i cinque blocchi rappresentativi degli orchestrali all'interno della fossa per registrarne l'impatto.

Il risultato in termini di temperatura è sostanzialmente sovrapponibile a quanto verificato nel caso 3), fatta eccezione per il fatto che in questo caso la sala e la fossa presentano valori confrontabili e che in corrispondenza della parte retrostante il palcoscenico si crea un fenomeno di ricircolo più marcato rispetto ai casi analizzati.



Anche sulla velocità questa sostanziale uniformità di temperatura attraverso l'intera sezione crea meccanismi che ricalcano quelli del caso 3) ma che, da questo fatto, sono rafforzati in intensità. Si rende infatti più evidente il ricircolo d'aria nella zona retrostante il palco, così come aumenta la velocità e il volume d'aria coinvolta nel flusso d'aria che lambisce torre, palco e sala.

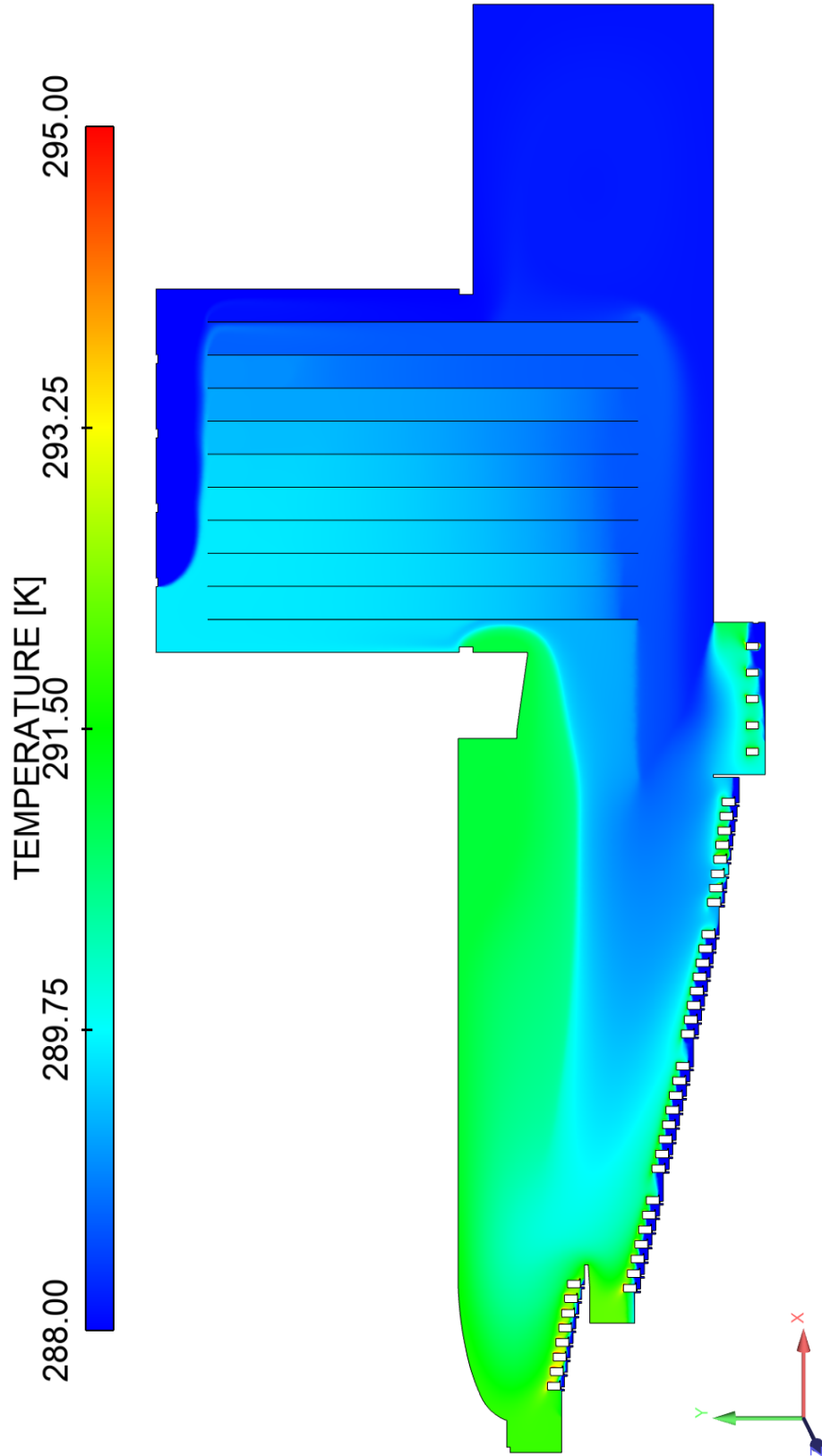


4.6 Caso 6

A partire dall'ultima configurazione, quella del caso 5) si inseriscono i pannelli delle scene, calati dalla sommità della torre, per rappresentare uno scenario comune a molti spettacoli che hanno luogo in teatro, ma soprattutto, per comprendere se il flusso dell'aria sia influenzato da tali pannelli, se venga cioè in un certo senso incanalato, per raggiungere il palco in getti puntuali estremamente spiacevoli per chi vi lavora.

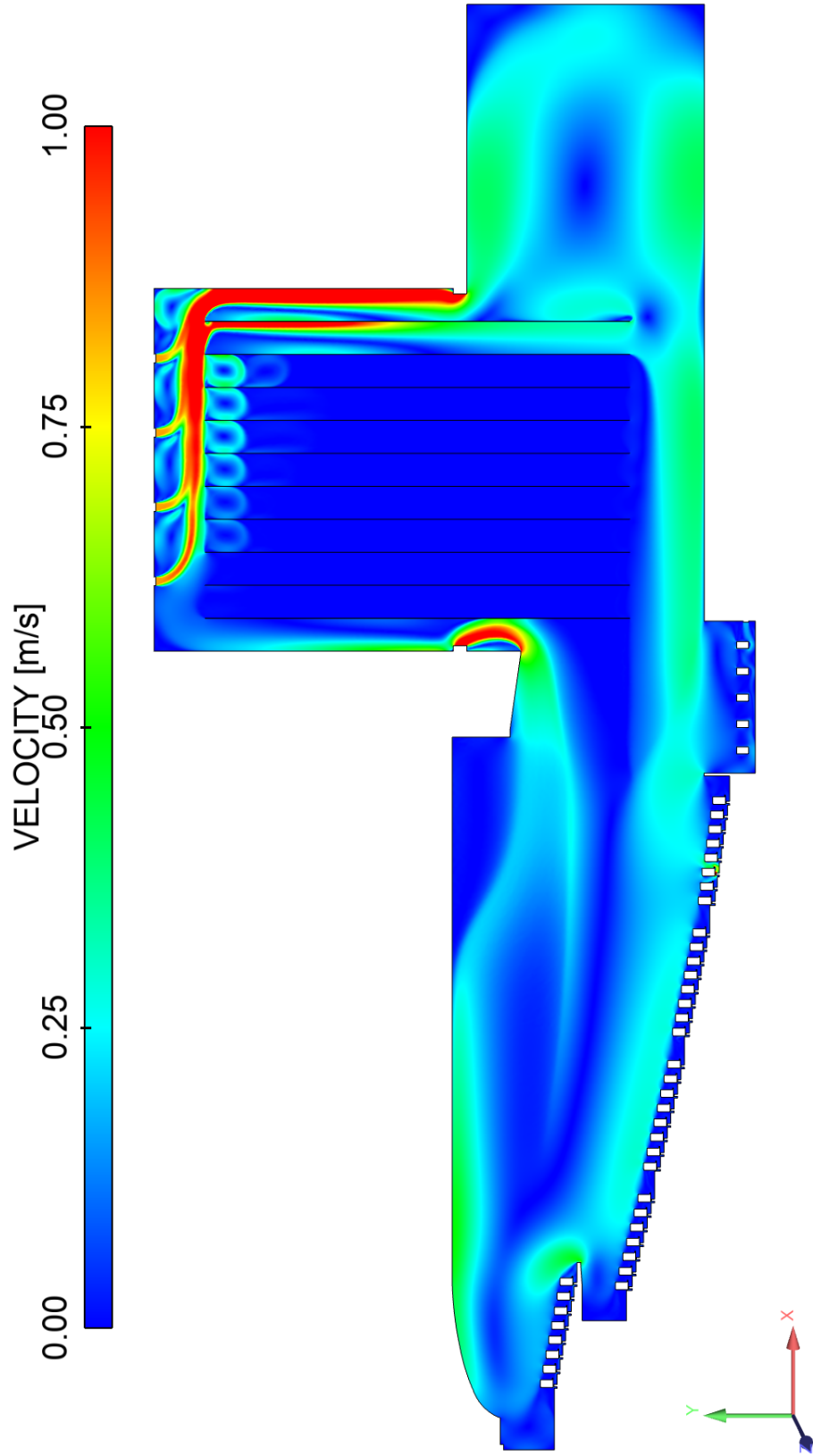
Per quanto riguarda la temperatura, tali pannelli sembrano in un certo senso “bloccare” parte dell'aria proveniente dalle bocchette di immissione della torre per confinarla nella zona retrostante il palco: tale volume di aria fredda trova poi un canale preferenziale di immissione verso la sala nello spazio che separa il palco dalla successione delle scene.

L'andamento della temperatura nella sala risulta quindi analogo ai casi precedenti anche se caratterizzato da valori un po' minori: l'aria più calda, intorno ai 292 K, lambisce il soffitto della sala e l'estremità posteriore di platea e galleria, mentre la zona più in basso rimane più fredda, attorno ai 289K-290K.



Considerando ora i risultati relativi alla velocità, la prima cosa che salta all'occhio è che in realtà l'aria non viene incanalata tra un pannello e l'altro: si creano dei piccoli vortici nella parte sommitale, ma, ancora una volta, è l'instabilità del getto immesso nella torre a prevalere: esso risulta sempre spostato verso la parete di fondo e solo l'ultimo "canale" presta una via preferenziale di deflusso al getto.

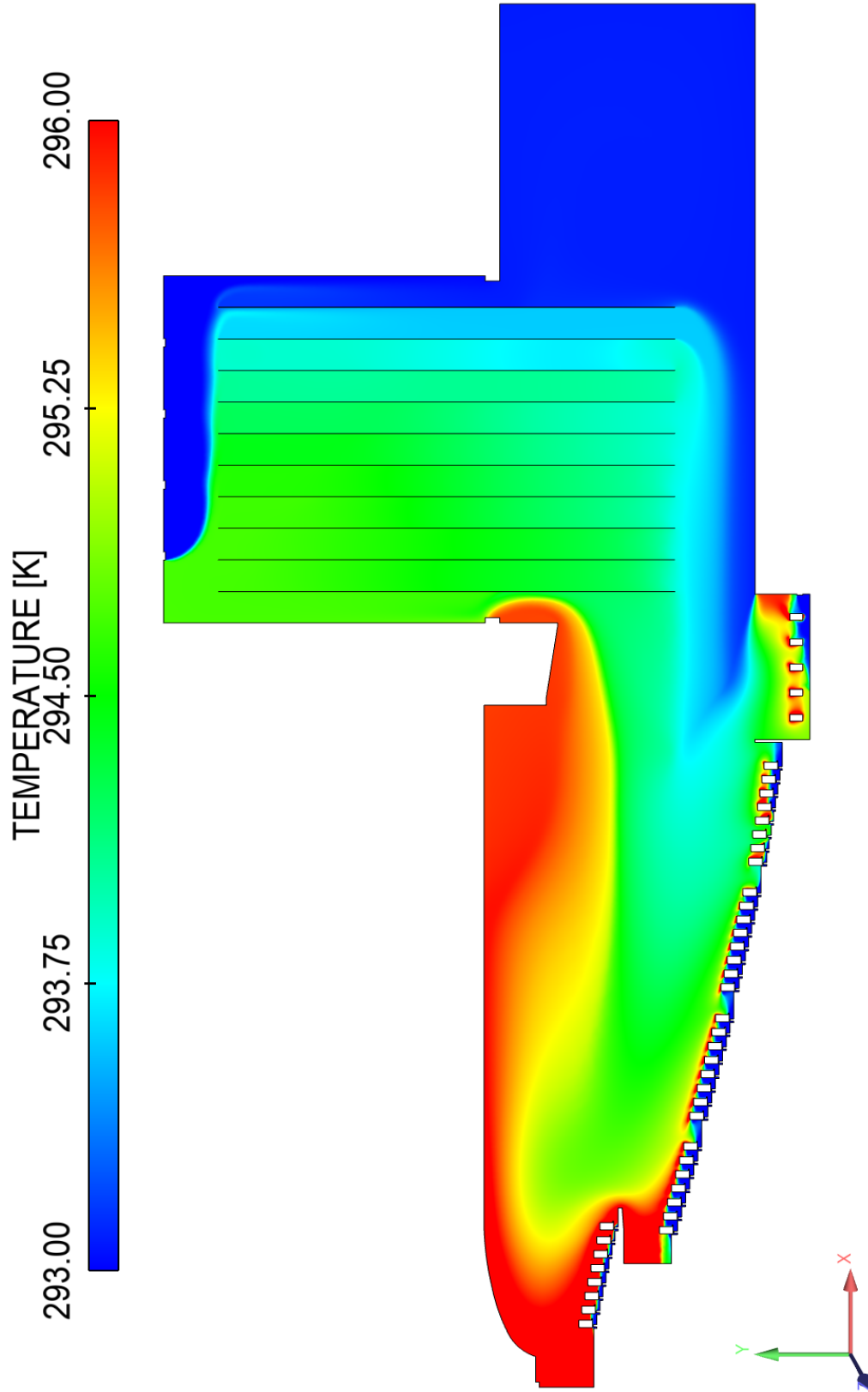
Per quanto riguarda sala, palcoscenico e fossa lo scenario si conserva pressoché analogo ai precedenti: il ricircolo nell'area posteriore del palco, il flusso che da lì sembra scorrere sul palcoscenico per vorticare attorno l'intero profilo della sala, la fossa interessata da diverse correnti localizzate; anche i valori di velocità risultano sostanzialmente inalterati.



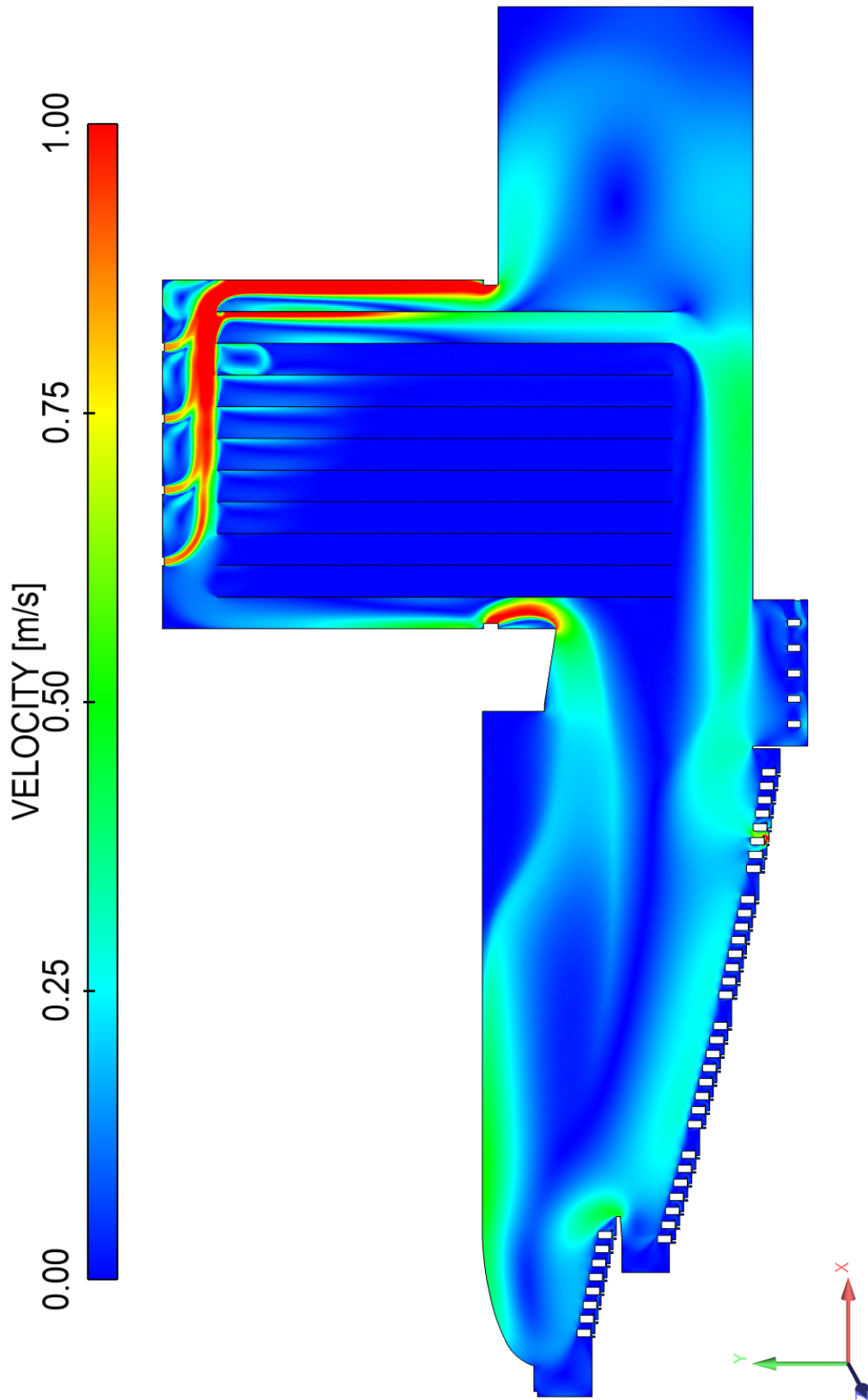
4.7 Caso 7

Si sceglie infine di valutare quanto questi particolari fenomeni che hanno luogo in questo ultimo caso possano subire variazioni al mutare della temperatura di immissione dell'aria: si ipotizza quindi che questa non sia, come in realtà è, pari a 288 K, ma di 293 K, valore che di per sé in un comune ambiente verrebbe preso come standard di riferimento per il comfort interno.

Questa ipotesi, tuttavia, consente di rilevare che in realtà, i fenomeni che hanno luogo all'interno del teatro sono gli stessi: l'andamento della temperatura infatti si conserva costante, anche se cambiano ovviamente i valori in gioco. La parte sommitale della sala in questo caso raggiungerebbe infatti i 296 K mentre il resto della sala si attesterebbe attorno ai 294-295 K, così come la parte frontale della torre, mentre la parete di fondo di quest'ultima, ancora una volta registrerebbe il valore minimo, pari a 293 K comune alla parte retrostante il palco. Una lama d'aria fredda si adagerebbe lungo la pavimentazione del palco incanalandosi sotto le scene e la fossa sarebbe caratterizzata da forti gradienti di temperatura.



Il minor range di temperatura presente all'interno della volumetria del teatro, fa sì che i flussi d'aria siano gli stessi riscontrati inserendo la temperatura di immissione pari a 288 K, ma che risultino in un certo senso “smorzati”, ridotti in intensità, sia per quanto riguarda i valori di velocità raggiunti, sia per quanto concerne le masse d'aria coinvolte nel flusso.



4.8 Modello 3D

Concluse le simulazioni bidimensionali si rende necessaria l'analisi dei risultati relativi al modello tridimensionale.

In primo luogo è bene ricordare quali sezioni sono state scelte come rappresentative dell'andamento di temperatura e velocità all'interno della volumetria del teatro; tra le sette selezionate si trovano:

- due in corrispondenza della mezzeria delle bocchette di immissione dell'aria della torre (A1-A2) e quattro nella mezzeria delle bocchette della fossa degli orchestrali (B1-B2-B3-B4);
- una nella mezzeria del volume complessivo (C1).

La prima cosa che si può rilevare osservando i risultati relativi all'andamento della temperatura è una divisione piuttosto netta tra le condizioni della sala e quelle di torre, fossa e palcoscenico.

L'aria calda infatti, che raggiunge temperatura prossime ai 302 K, salendo verso l'alto, si stratifica, e si accumula alle estremità della sala in corrispondenza di platea e galleria, dove la quota libera è inferiore, e lambisce poi il soffitto di tutta la sala.

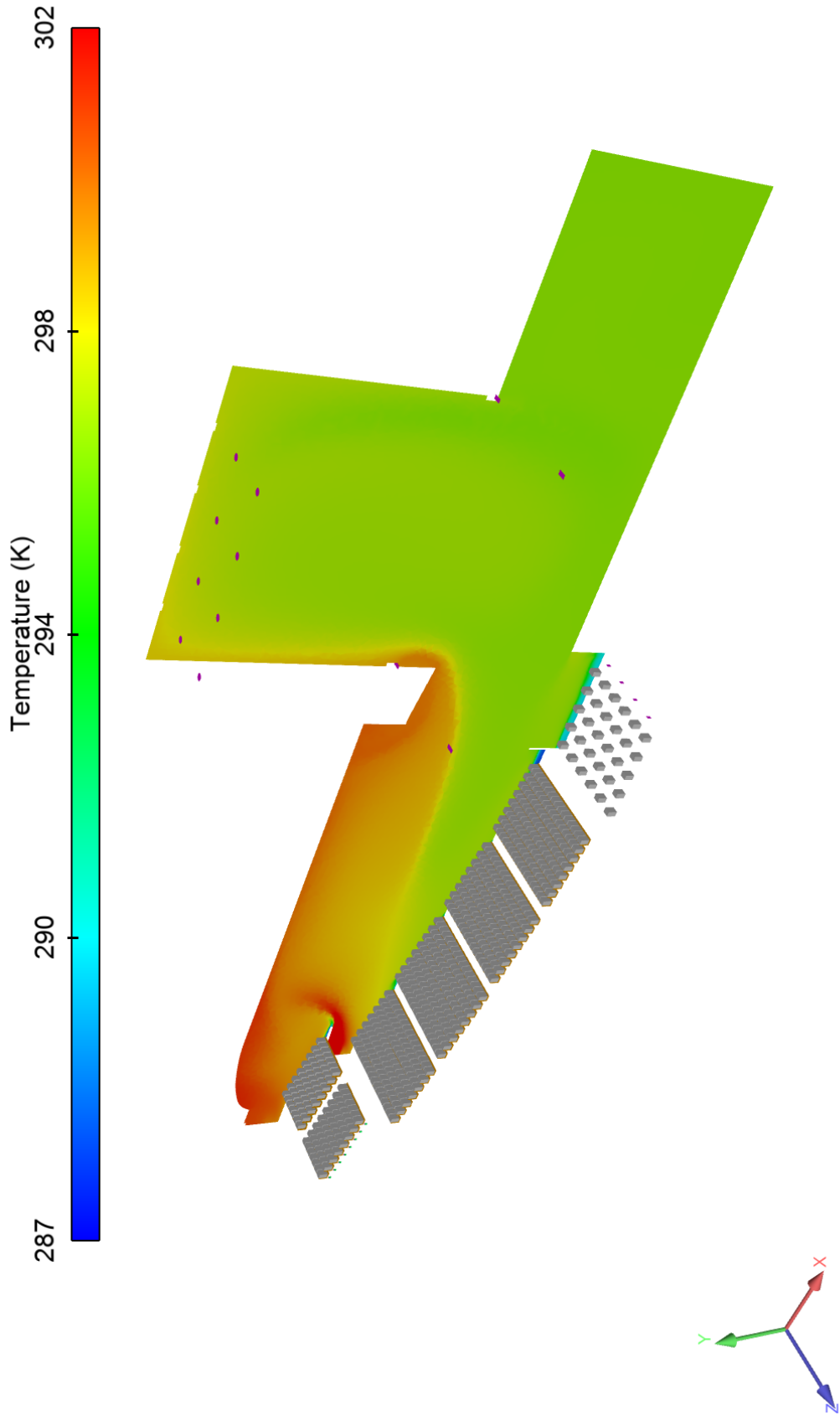
Questa stratificazione rende le condizioni di quella porzione della sala davvero critiche in termini di comfort, mentre la restante parte dell'ambiente conserva temperature prossime ai 297 K. E' proprio quest'ultima parte a fare da trait d'union con la zona della torre e del palcoscenico, condividendone sostanzialmente le condizioni termiche.

A questo punto però bisogna distinguere: se le condizioni della sala si conservano pressoché uniformi nelle diverse sezioni prese in analisi, per quanto riguarda la torre la situazione varia a seconda che ci si trovi in corrispondenza del getto d'aria delle bocchette oppure no.

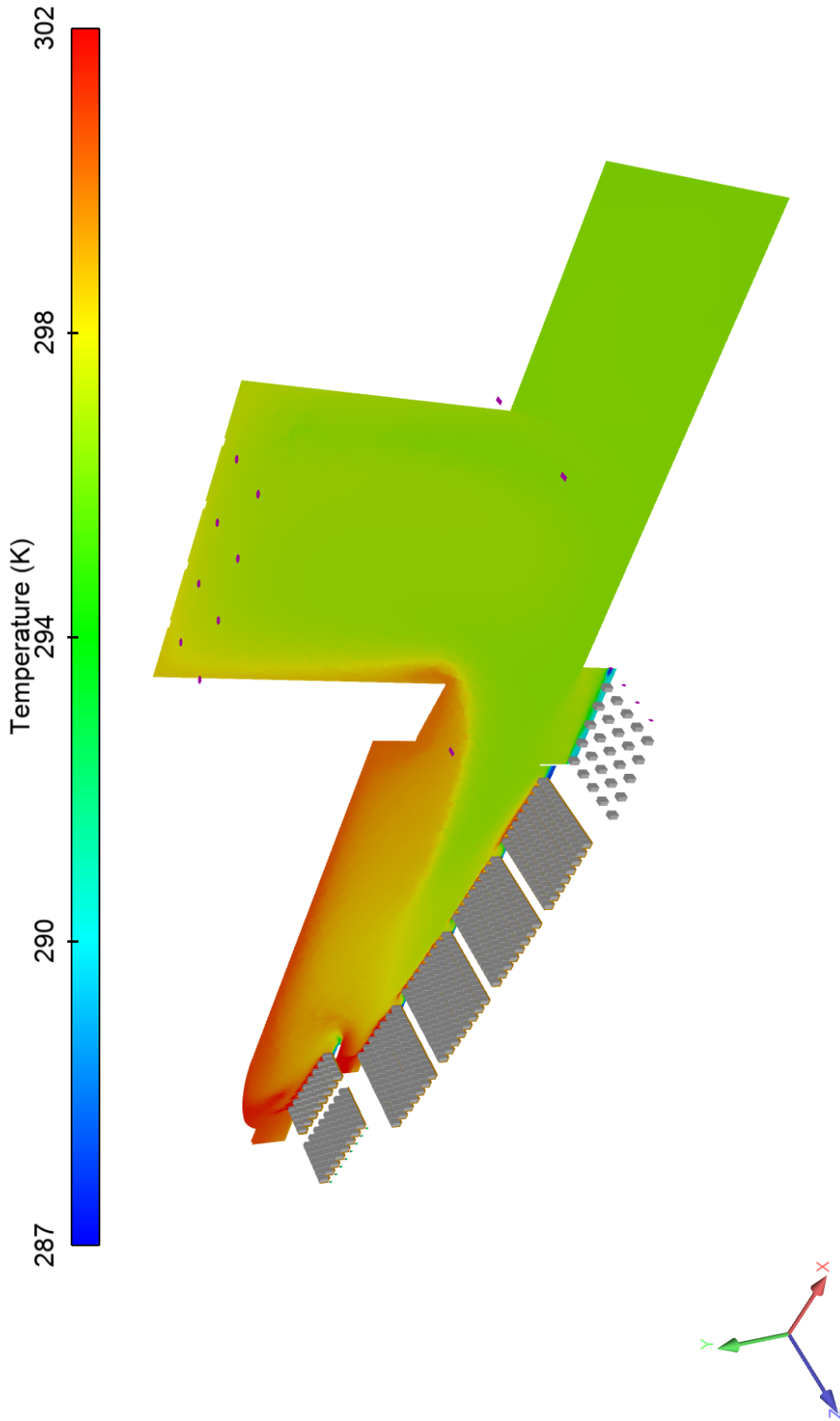
In corrispondenza del getto è ben visibile la situazione già rilevata nelle simulazioni precedenti: l'aria, immessa a 288 K, per fenomeni di instabilità viene indirizzata verso la parete di fondo, mentre l'aria calda proveniente dalla sala lambisce la parete opposta, innescando una sorta di ricircolo d'aria più fredda che circonda l'area del palco e la zona retrostante, che rimangono ad una temperatura attorno ai 296 K.

La fossa invece risulta ancora una volta la zona più fredda: in corrispondenza delle bocchette di immissione l'aria a 288 K rimane di fatto "intrappolata" sul fondo generando condizioni di grande discomfort, ma anche dove la bocchetta non è presente la temperatura non sale sopra i 292 K, nonostante la presenza degli orchestrali.

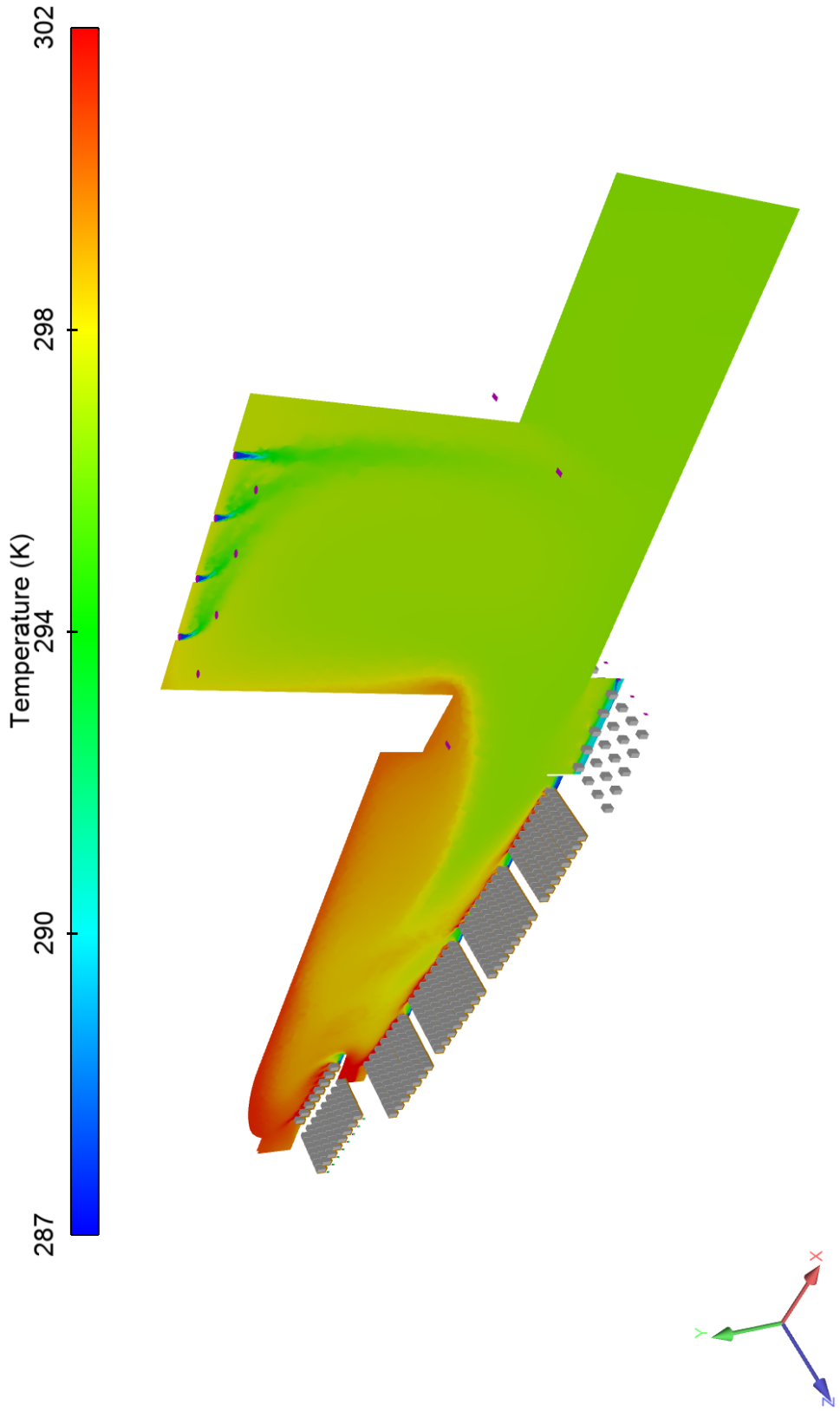
Sezione B1



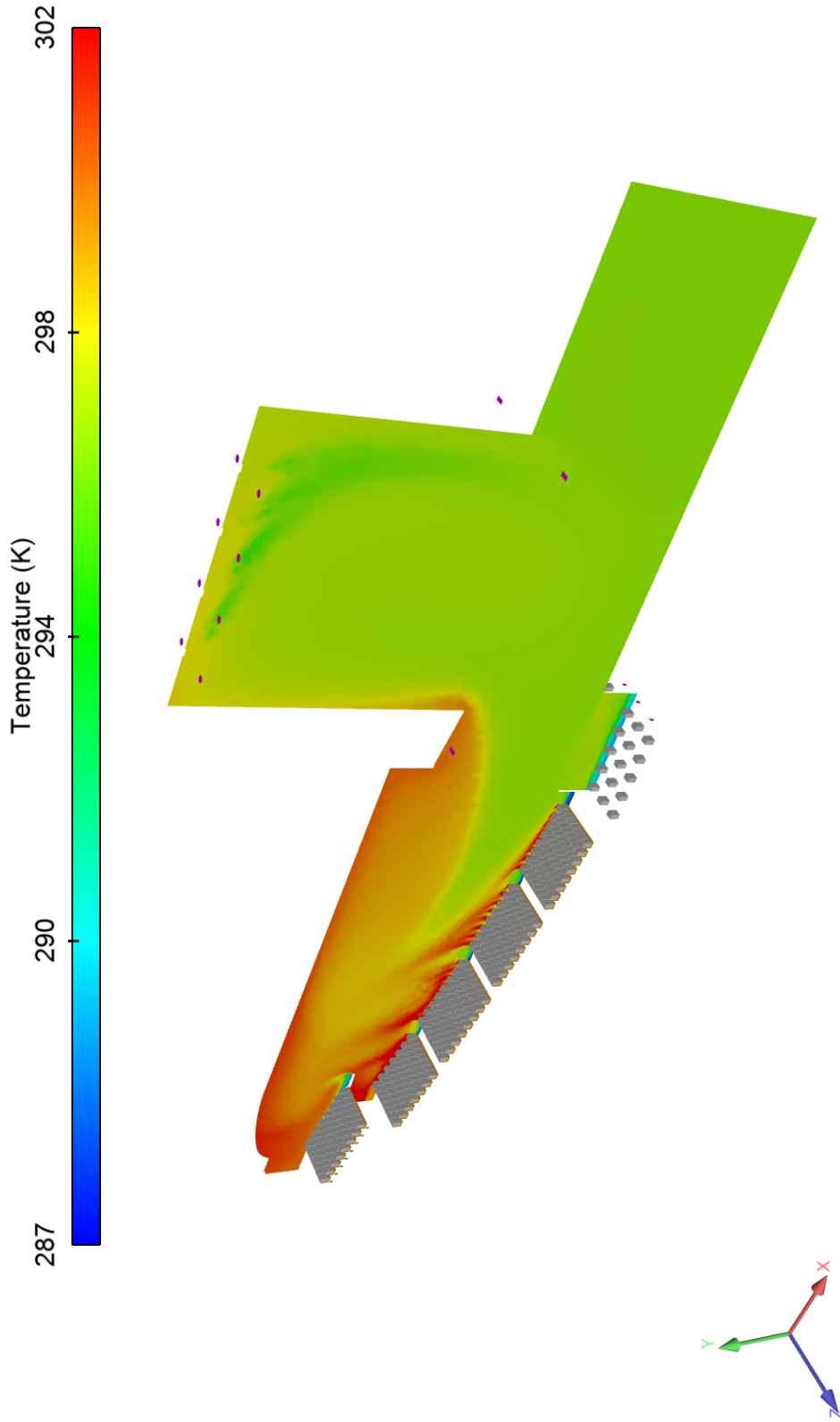
Sezione B2



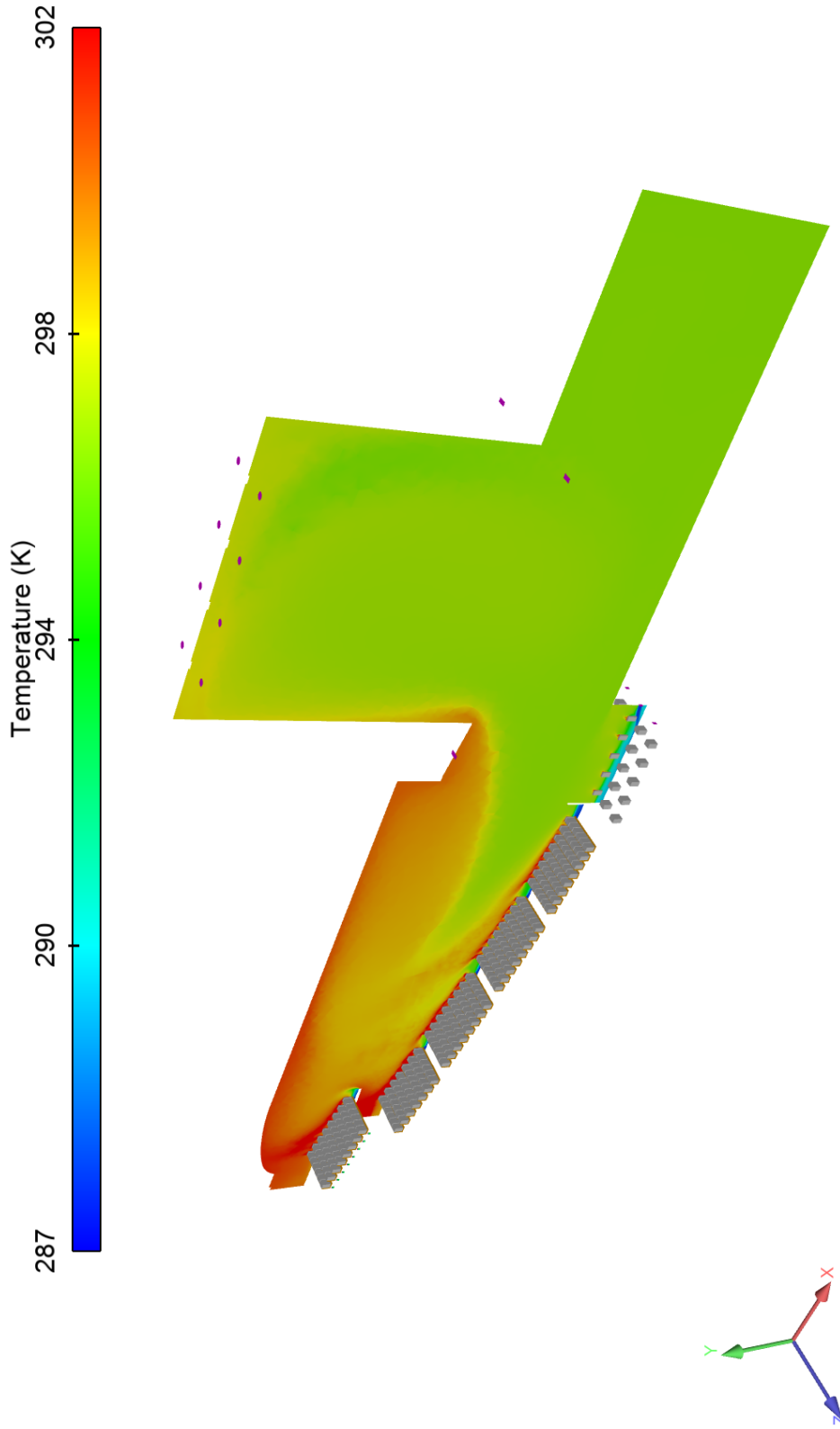
Sezione A1



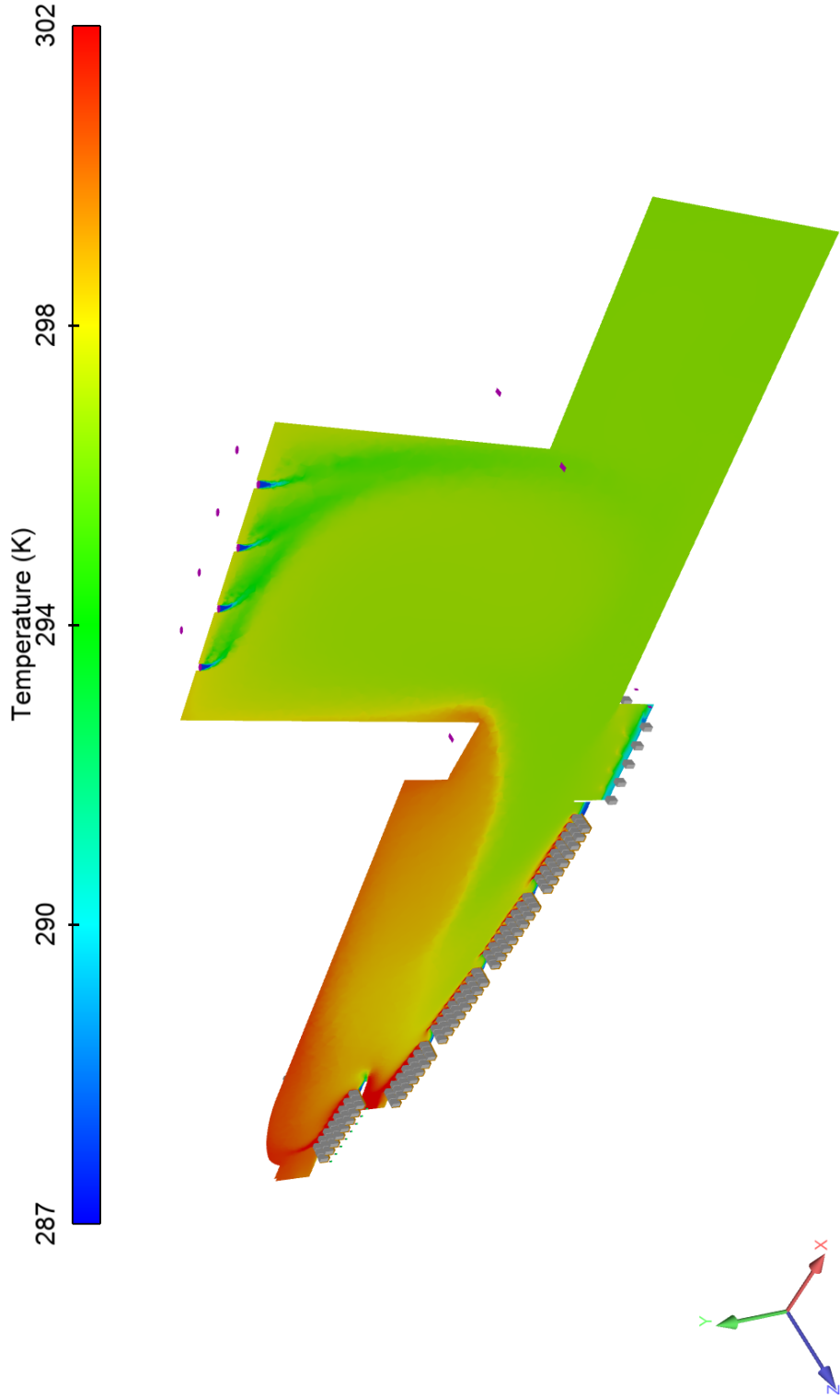
Sezione C1



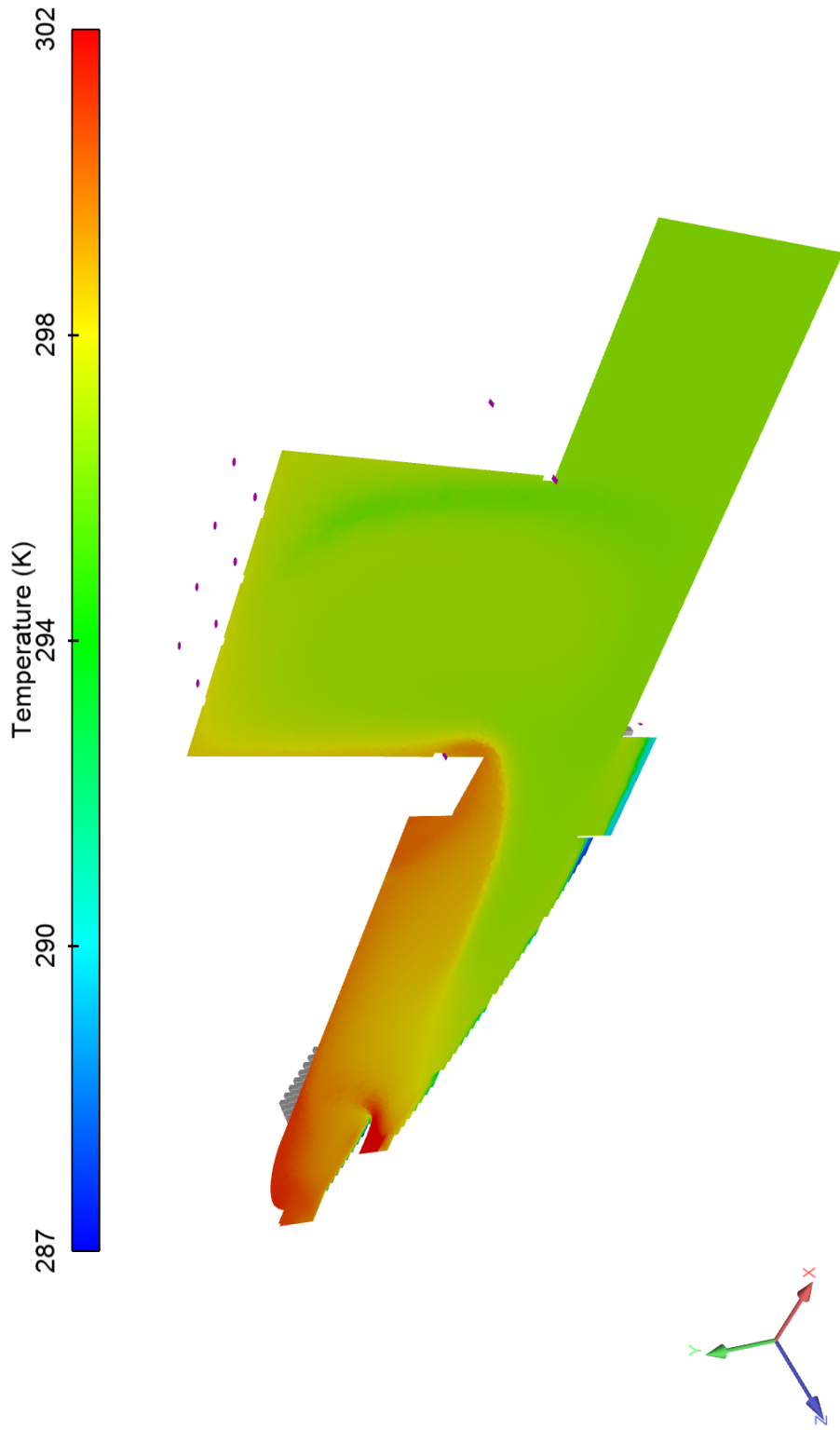
Sezione B3



Sezione A2



Sezione B4

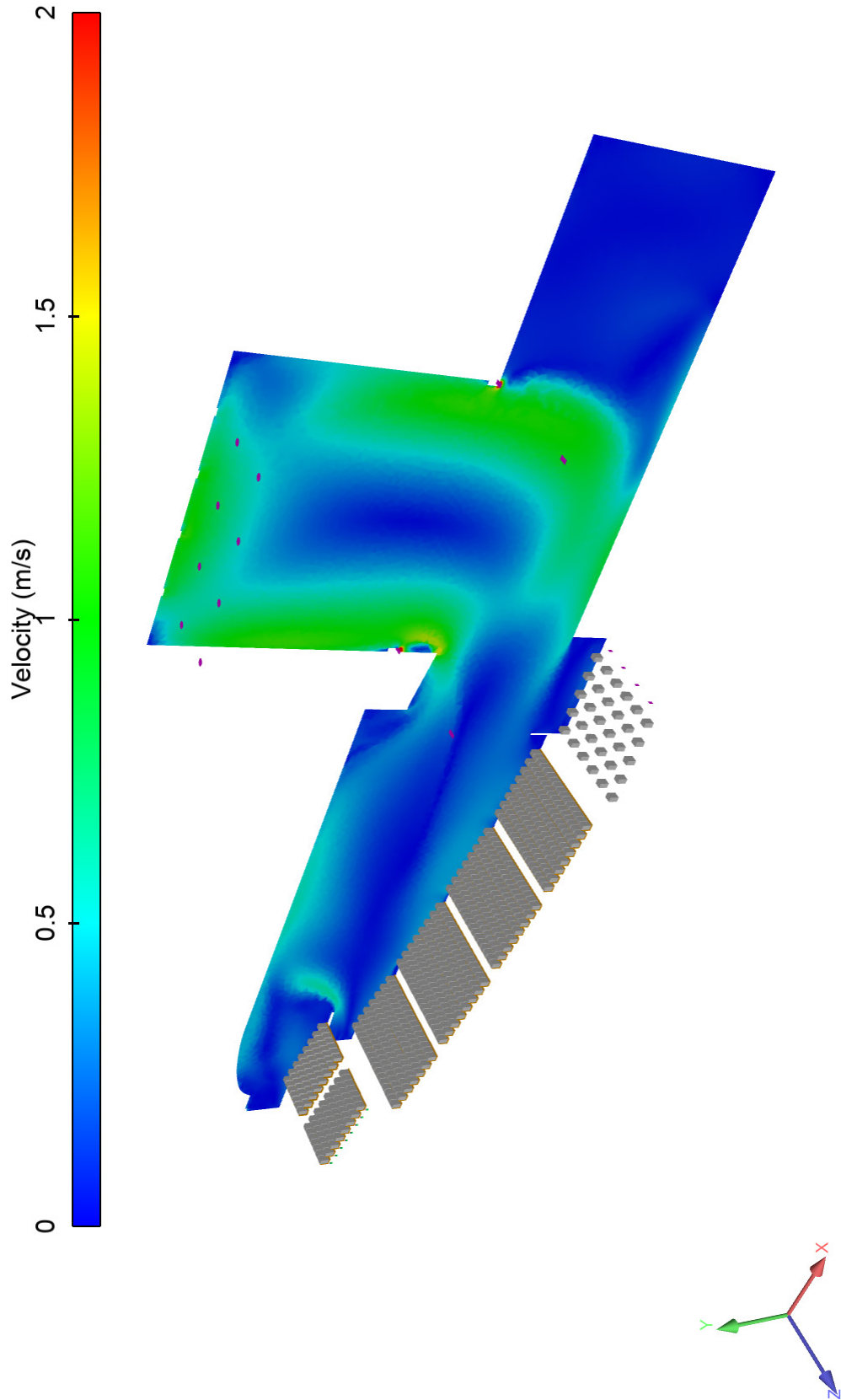


Passando ora a considerare i risultati relativi alla velocità, il flusso d'aria riconoscibile è quasi sovrapponibile a quello che emergeva dalle simulazioni bidimensionali: l'aria immessa dalla torre, spinta verso la parete di fondo, crea un ricircolo verso il basso, attraversa la zona del palcoscenico per andare ad interessare la parte sommitale della fossa prima, e la sala poi, dove si può notare un nuovo movimento rotatorio tutto attorno alle pareti.

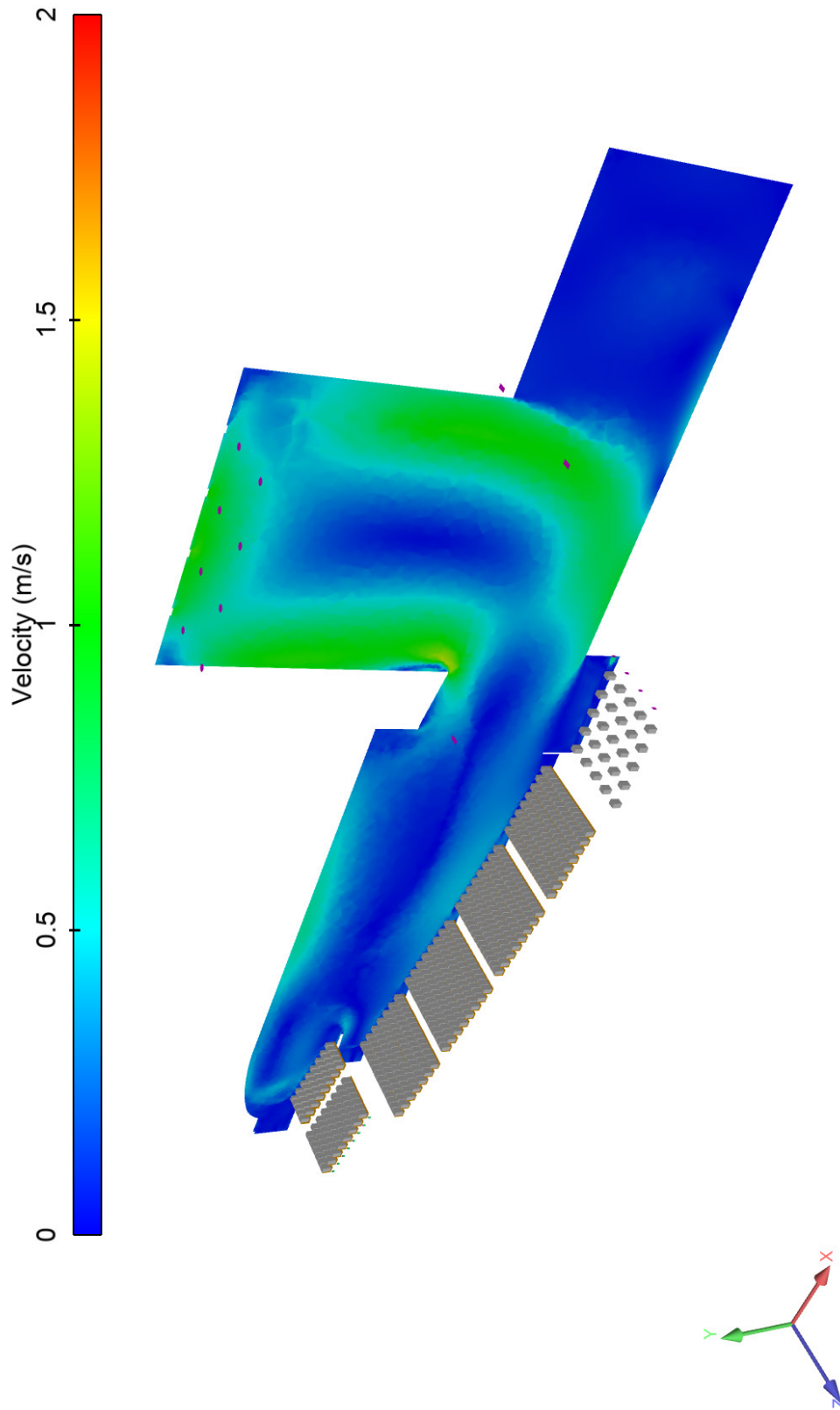
La fossa presenta poi ulteriori correnti interne probabilmente innescate anche dai forti gradienti di temperatura.

Sono proprio forse i forti gradienti di temperatura a far sì che i flussi che interessano le diverse porzioni del modello siano importanti sia per le masse d'aria coinvolte, sia per i valori di velocità: da un lato una grande mole d'aria calda che, per convezione naturale, tende a salire verso l'alto stratificandosi in corrispondenza della sala e dall'altro un'altra importante massa d'aria molto fredda immessa dall'alto che tende quindi a scendere rapidamente: questo non può che innescare i massicci moti convettivi di ricircolo che si possono notare.

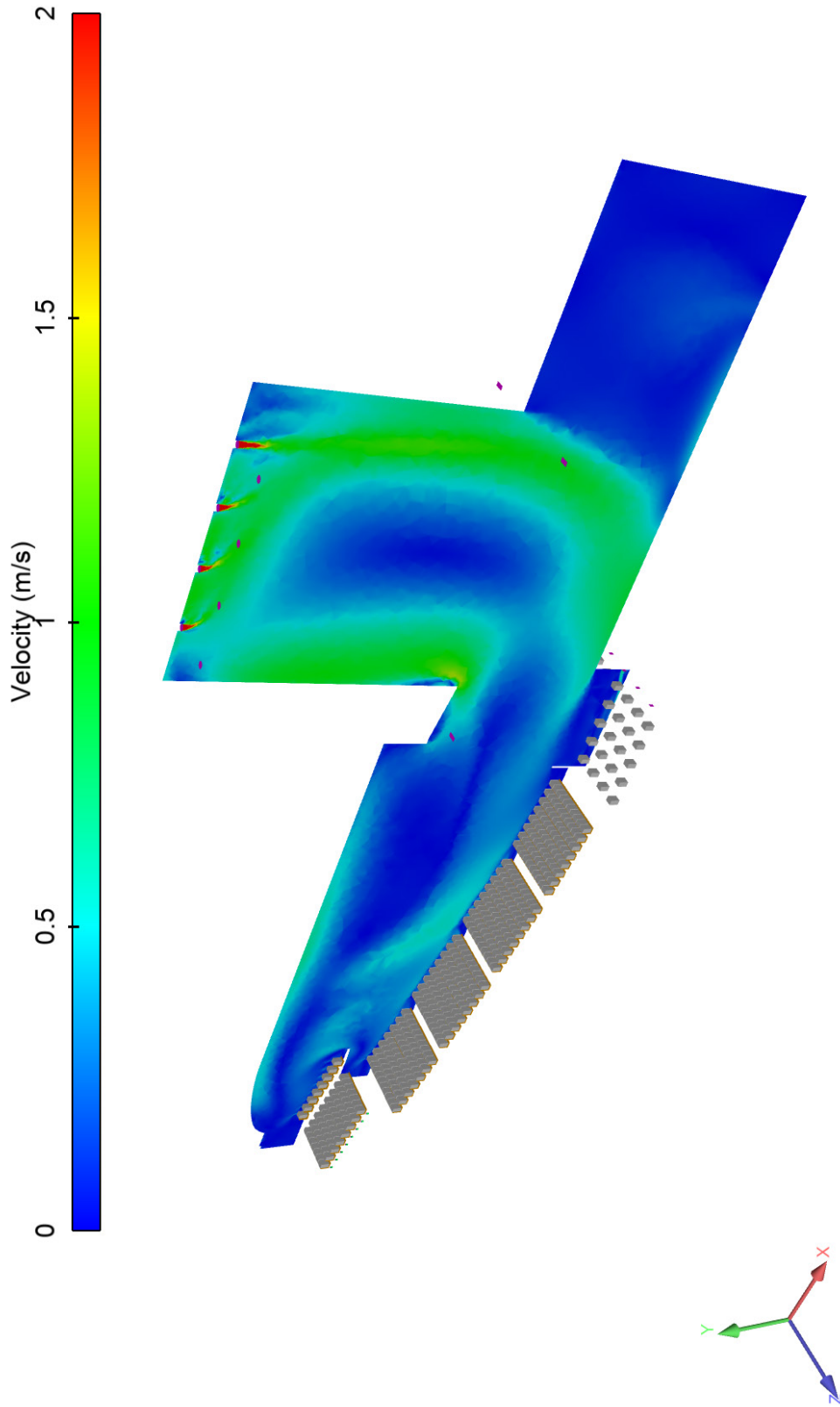
Sezione B1



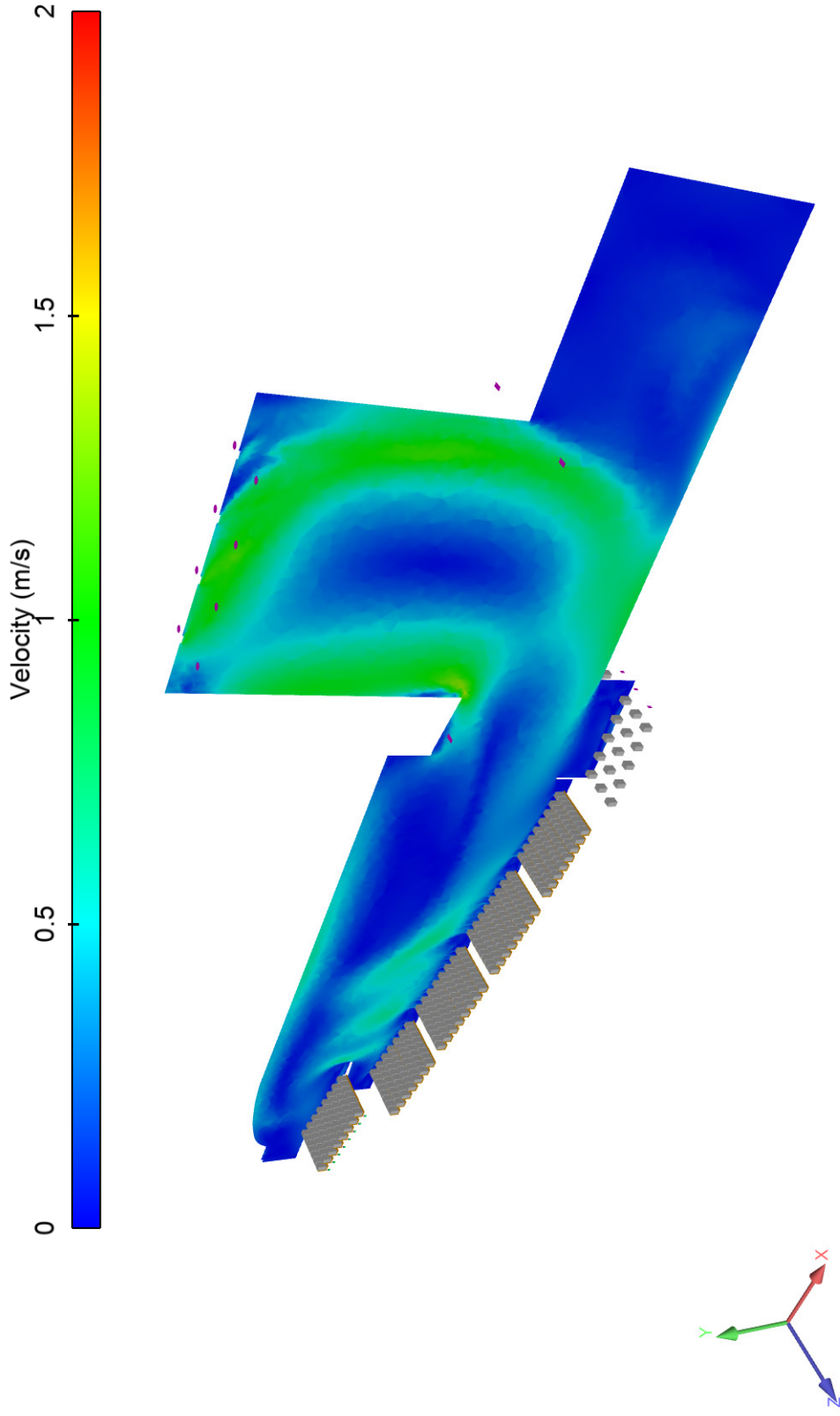
Sezione B2



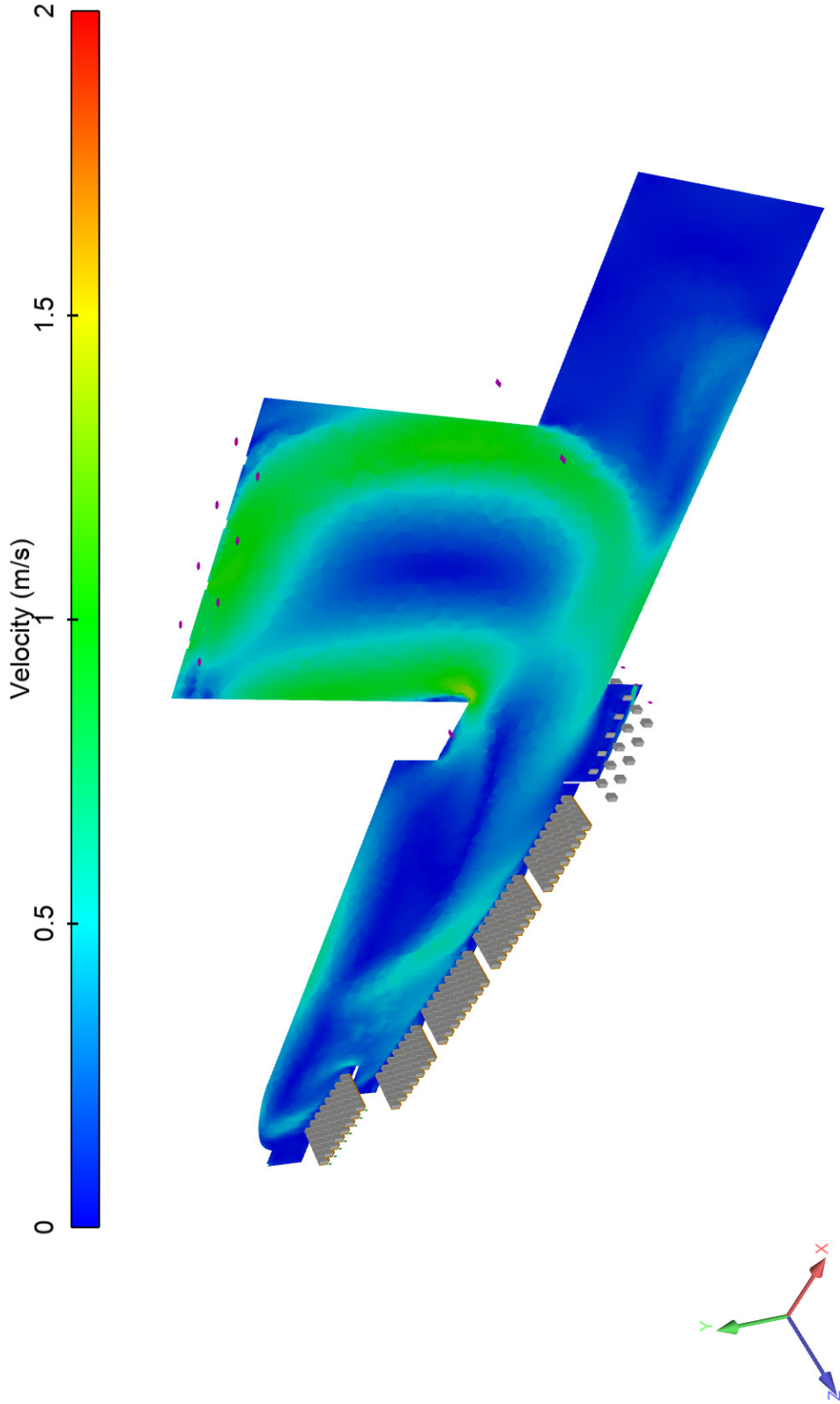
Sezione A1



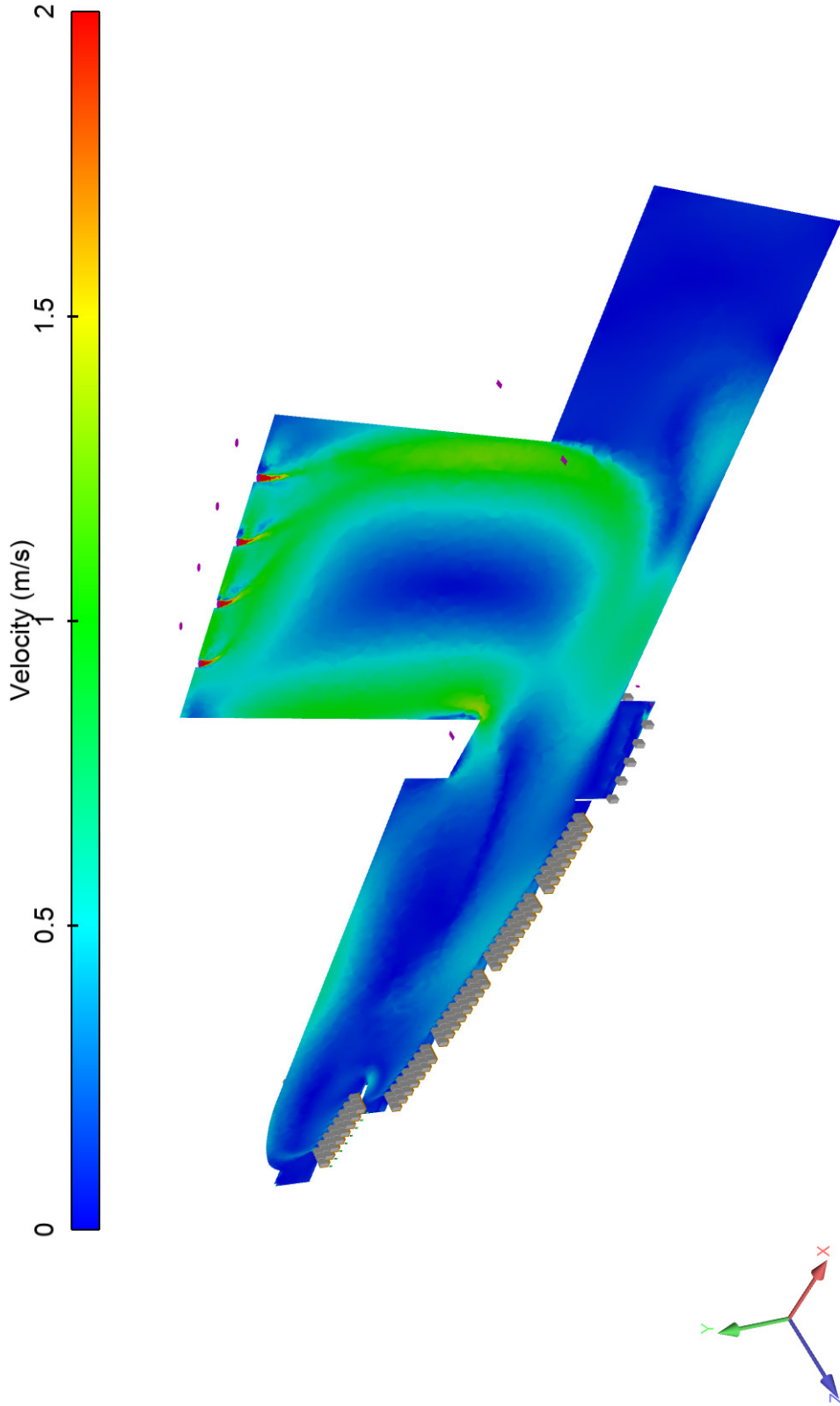
Sezione C1



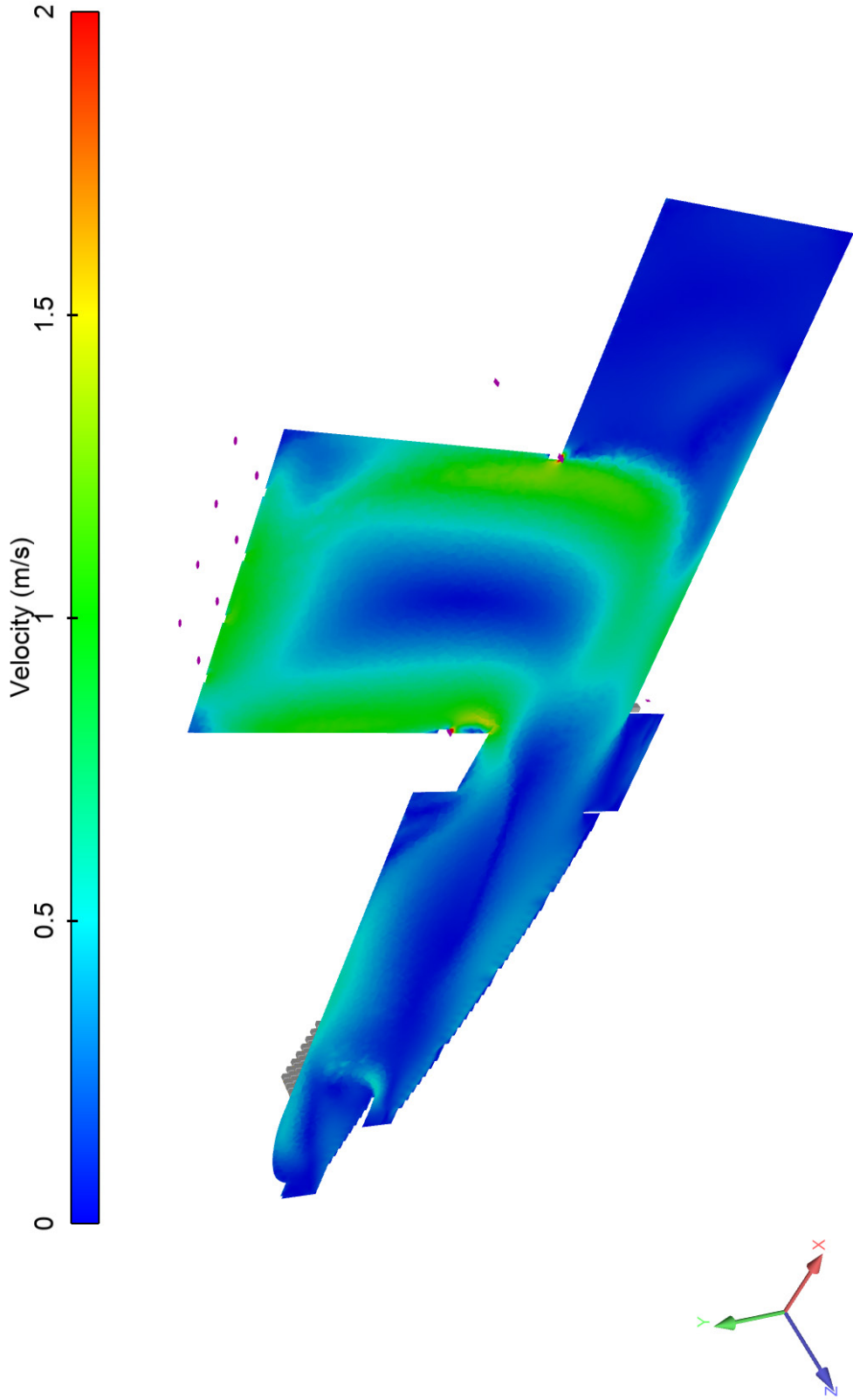
Sezione B3



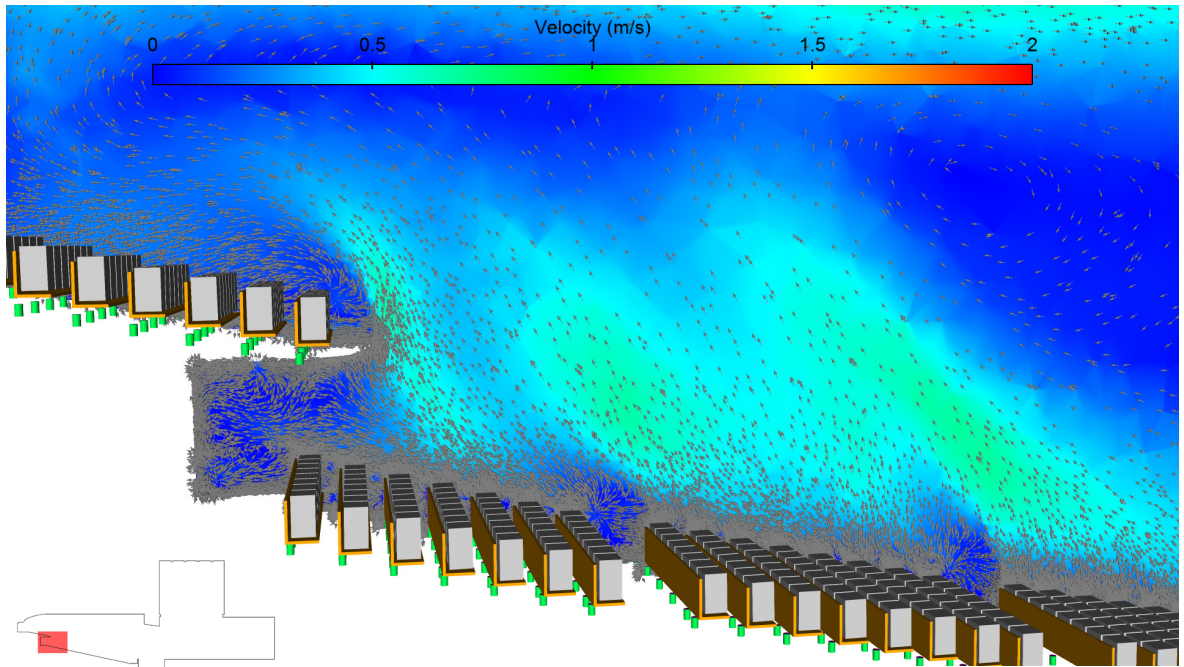
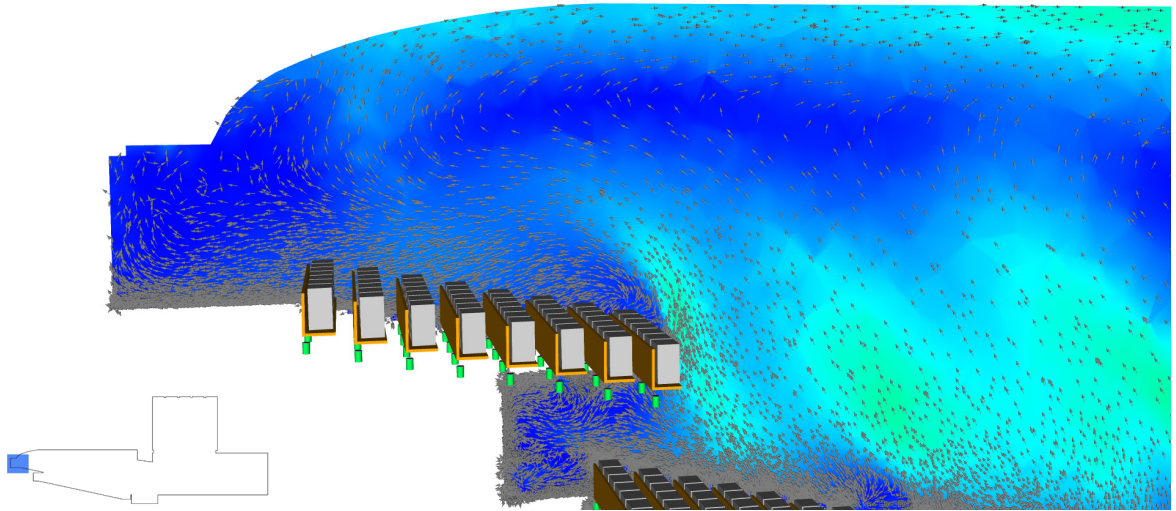
Sezione A2

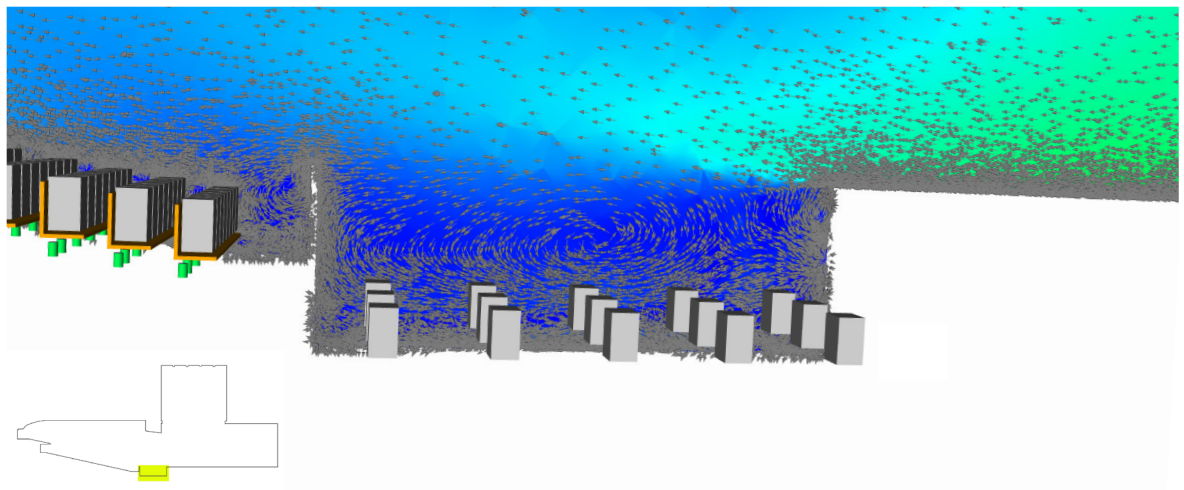
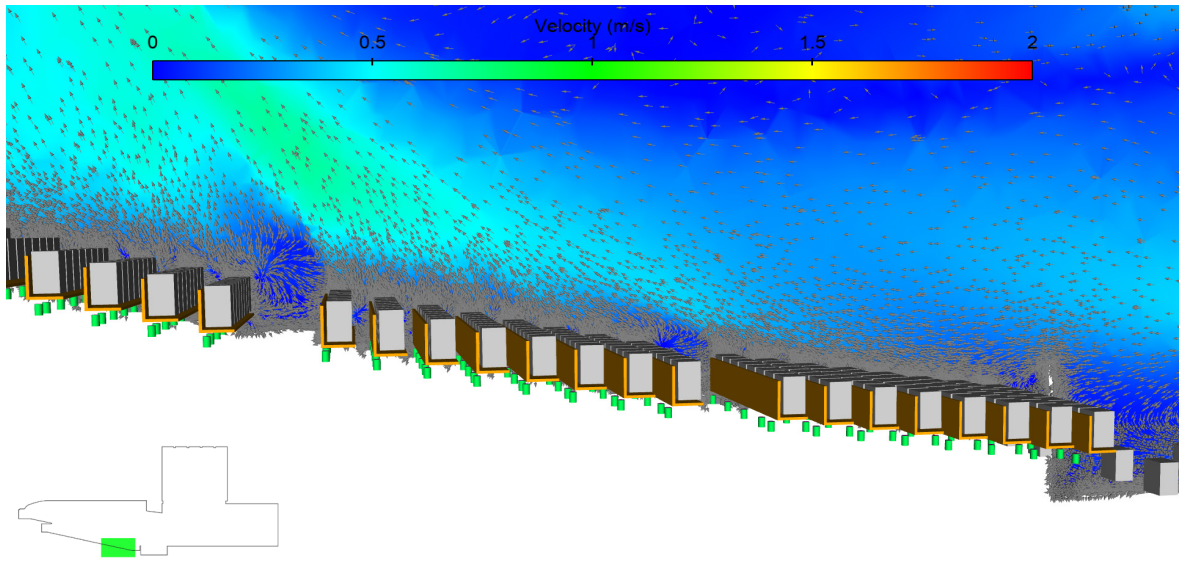


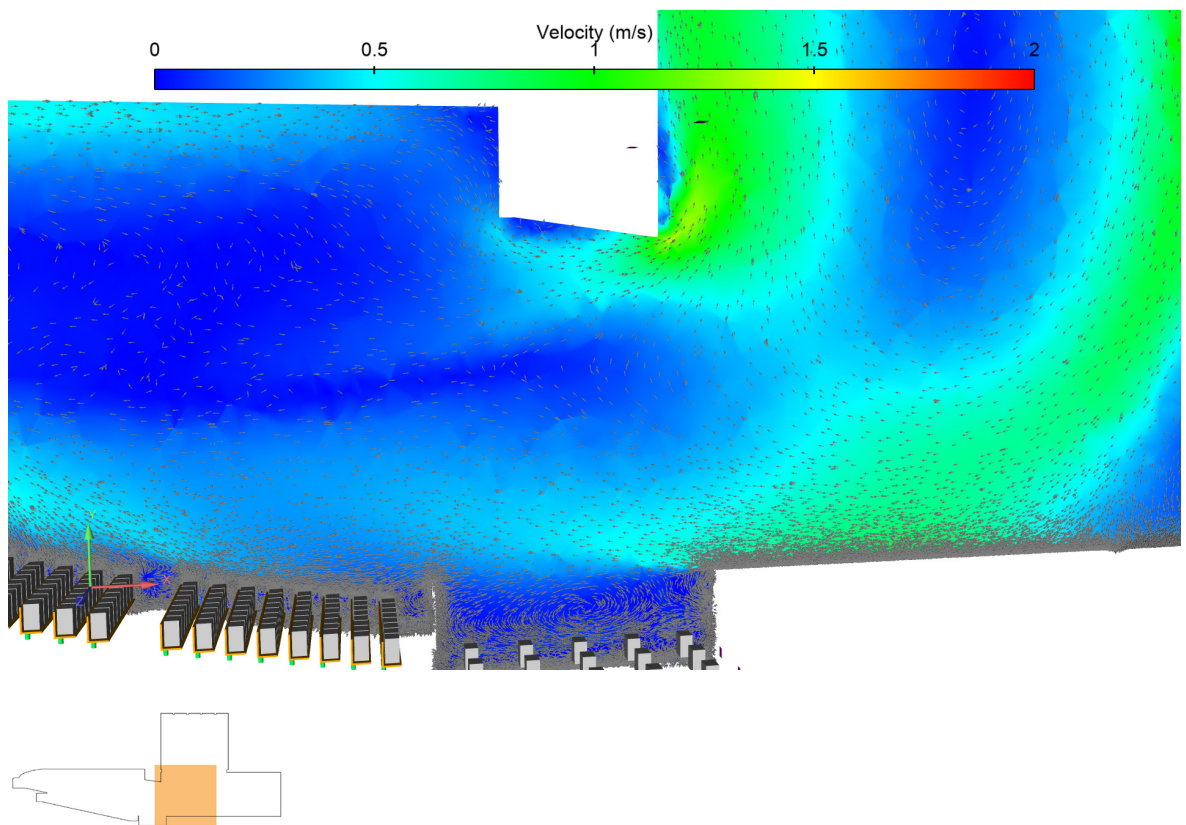
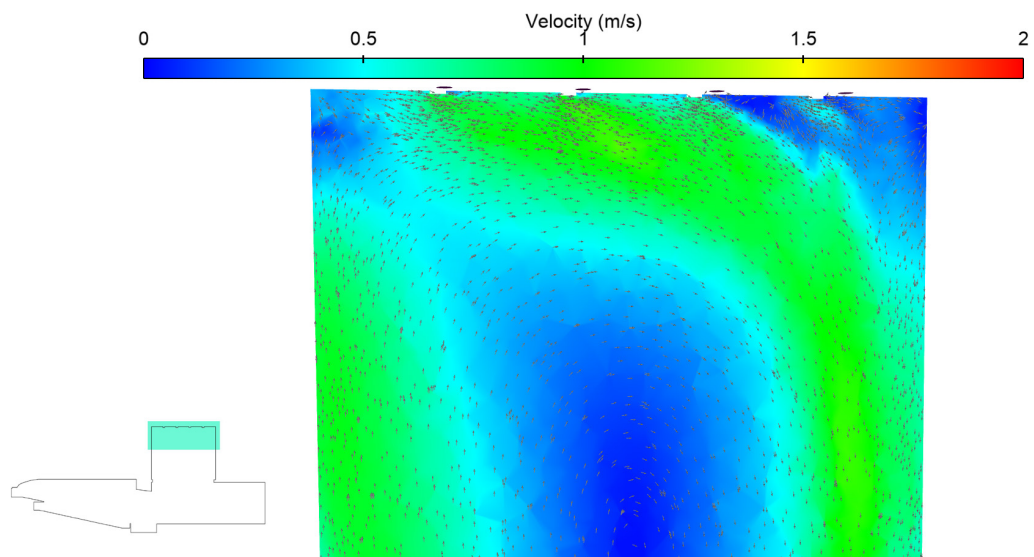
Sezione B4



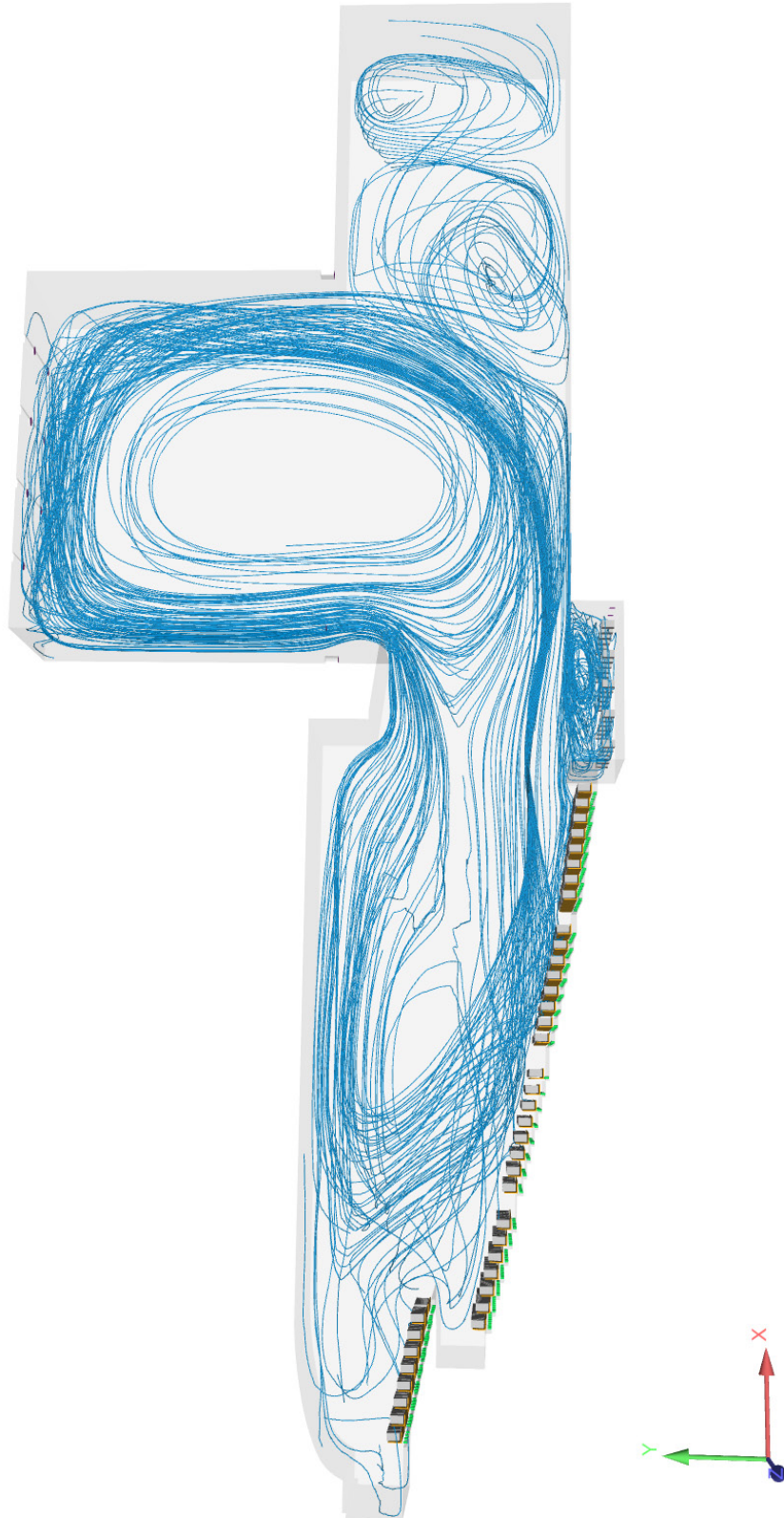
Proprio al fine di apprezzare maggiormente questi flussi sono stati estrapolati, in corrispondenza della sezione di mezzeria i risultati relativi ai vettori di velocità che consentono visualizzare il percorso dell'aria calda che si stratifica e dalla sala si muove verso la torre, e di quella fredda che dalla sommità della torre ridiscende e crea ricircolo nella zona del palcoscenico. In particolar modo questa visualizzazione consente di avere prova dei fenomeni particolarmente significativi che hanno luogo in corrispondenza della fossa dell'orchestra, in cui si concentrano e si sovrappongono numerosi flussi.

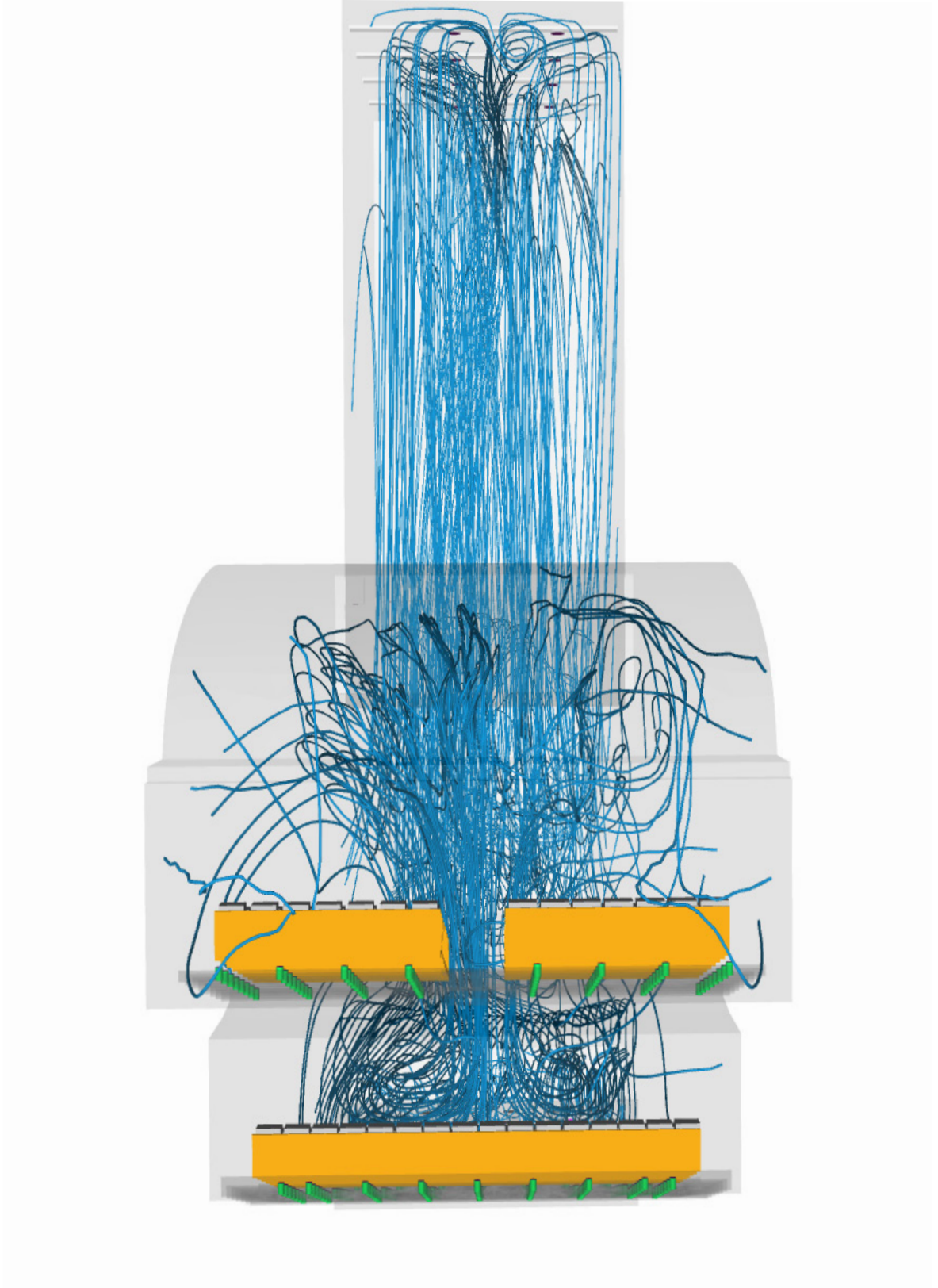


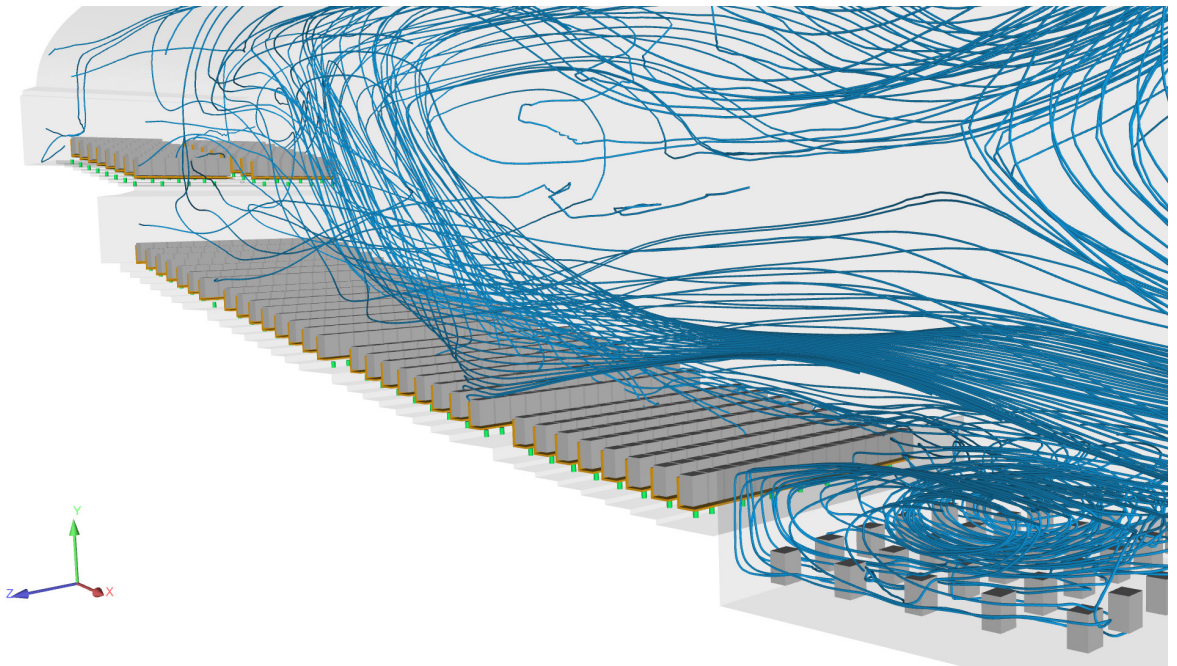
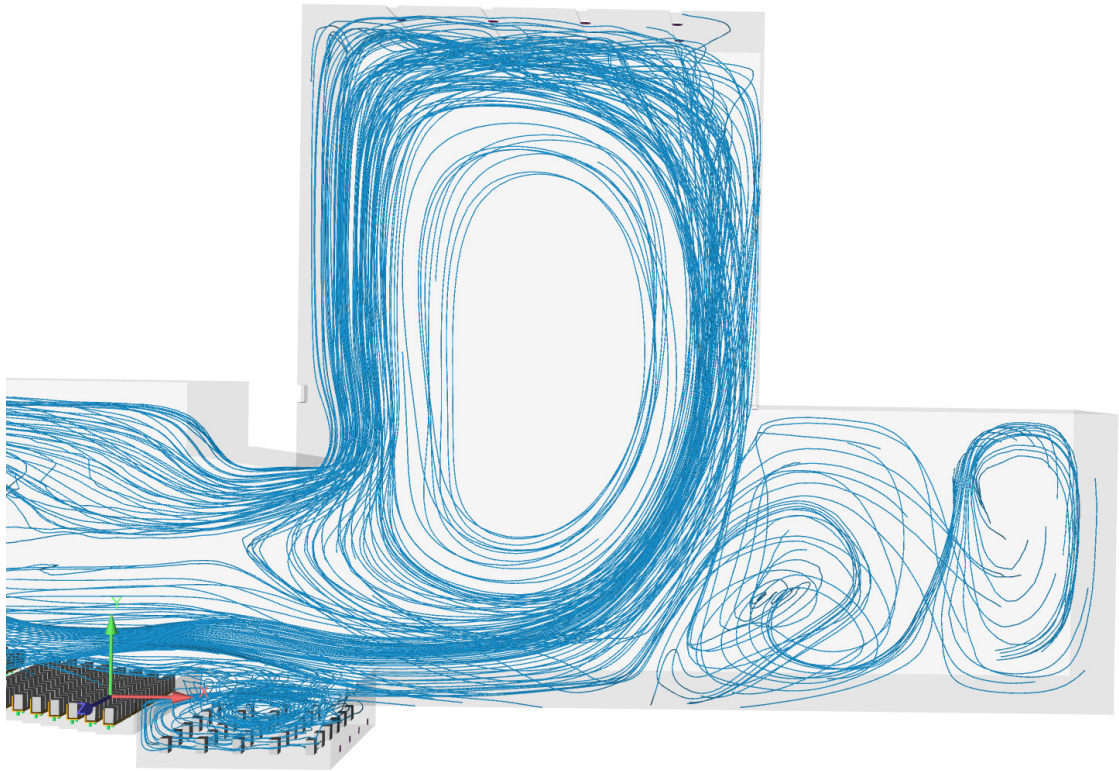


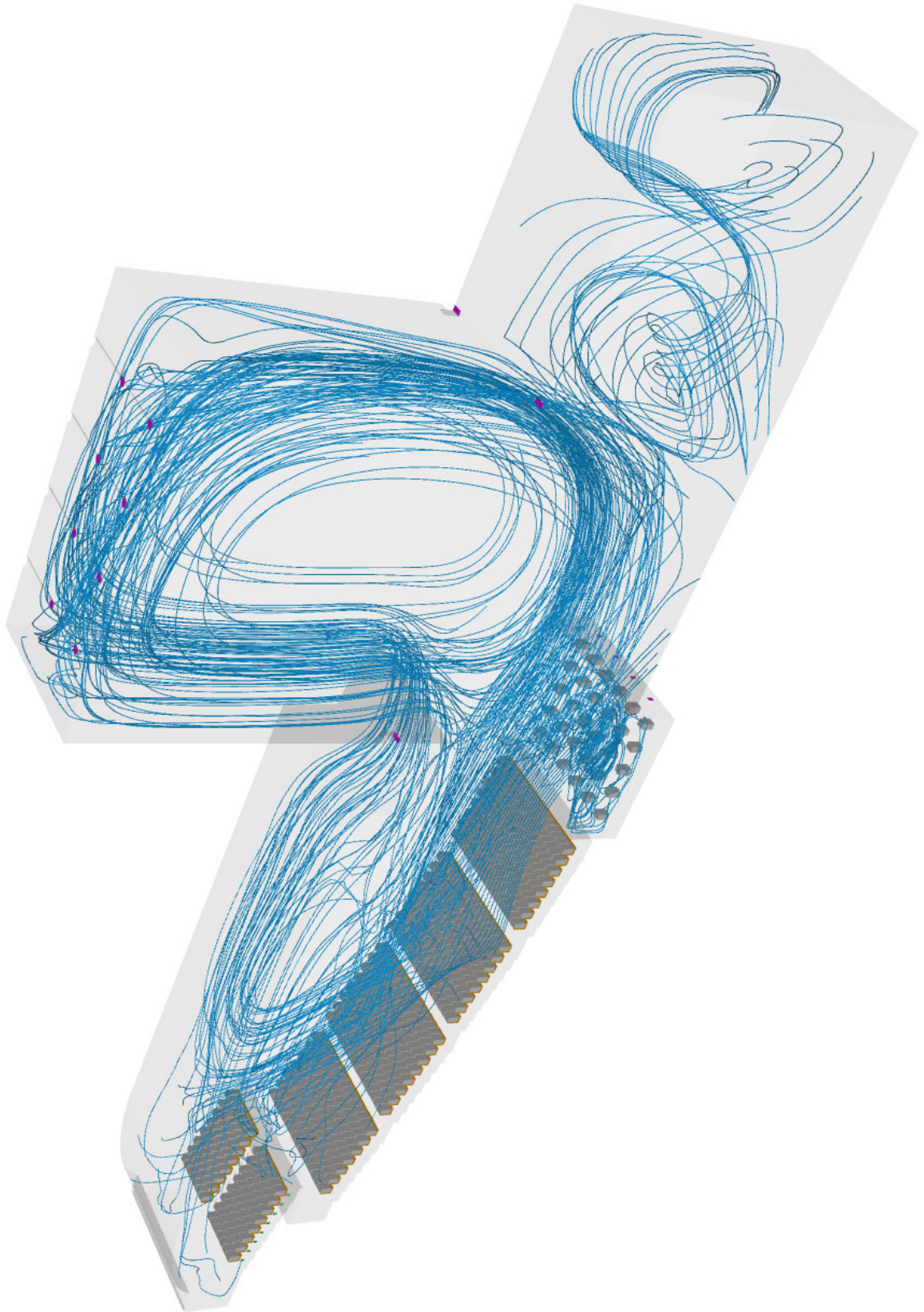


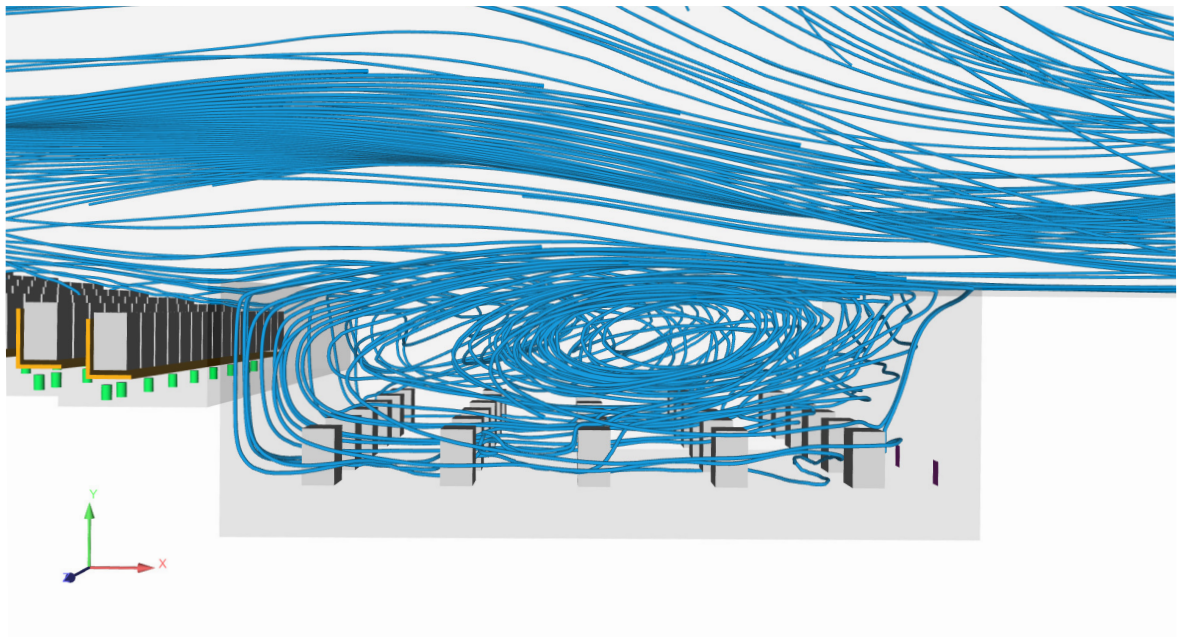
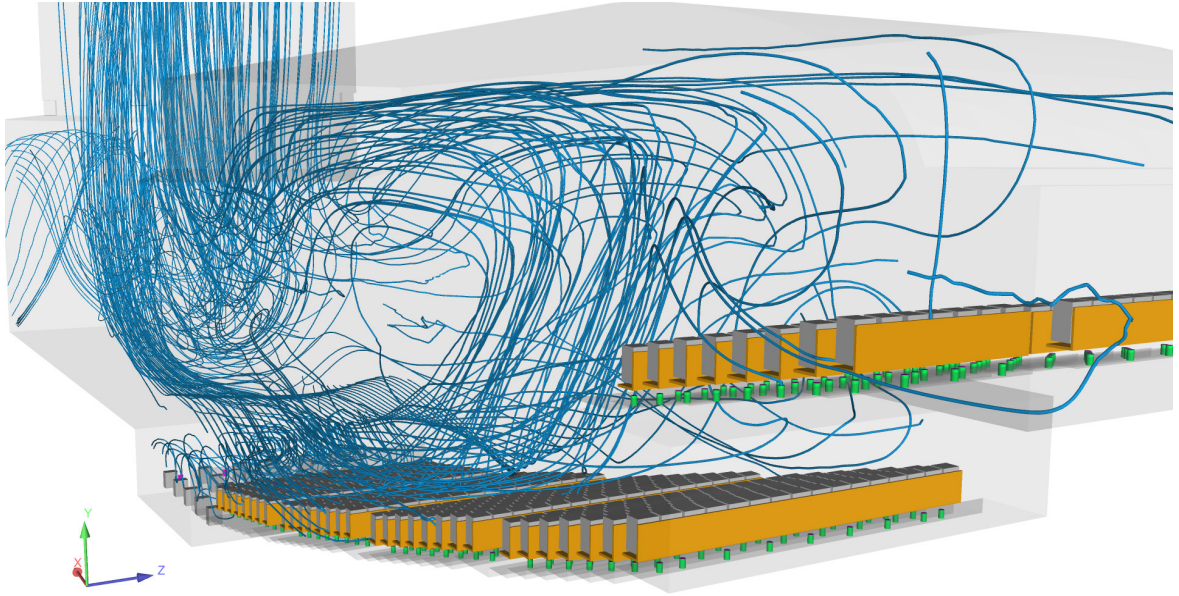
Sovrapponendo dunque i risultati così ottenuti, è possibile ottenere una rappresentazione sintetica data dall'andamento delle linee di flusso che permettono di cogliere nell'insieme le dinamiche che interessano l'intera volumetria.











Conclusioni

Dopo aver analizzato dunque i risultati ottenuti dalle diverse simulazioni, è possibile evidenziare alcune questioni che sono emerse via via nella trattazione.

La prima è senza dubbio una nota di carattere generale: si è deciso di articolare lo studio dei fenomeni fluidodinamici che interessano la sala principale del Teatro Carlo Felice attraverso una decina di modelli bidimensionali, in quanto consentivano un più agevole controllo sui parametri in gioco, richiedevano minori tempi di esecuzione e minori mezzi per portarle a termine. Tuttavia per avere una piena consapevolezza dei fenomeni si è concluso lo studio con un'analisi tridimensionale, un'analisi cioè che comportasse un minore grado di approssimazione, che permettesse di visualizzare i flussi come dovrebbero effettivamente avere luogo nella realtà.

In un certo senso l'idea era quella di trattare le analisi bidimensionali come una serie di studi preliminari per acquisire confidenza con l'oggetto dello studio per approdare poi alla simulazione principale, quella che avrebbe dovuto svelare le forti approssimazioni dovute alla precedente schematizzazione dei fenomeni sul piano.

In realtà i risultati ottenuti hanno in un certo senso smentito tutto ciò, non confermando le aspettative, fornendo insieme risultati al tempo stesso inattesi e confortanti.

Avendo svolto l'analisi tridimensionale, infatti, si è rilevato che i risultati erano pressoché coincidenti con quelli della rispettiva simulazione bidimensionale (Caso 5). Questo quindi evidenzia come ci sia coerenza tra i due modelli, e non ci siano quindi forme di incompatibilità nel passaggio dalle due alle tre dimensioni, ed al tempo stesso, però, rende chiaro il fatto che il contributo fornito dal modello tridimensionale è dato in termini di variazioni locali che consente di cogliere facendo traslare il piano in analisi, ma non di particolari alterazioni dei fenomeni globali che vengono di fatto riaffermati.

Questo consente di poter tenere in considerazione come rappresentative dei fenomeni nelle tre dimensioni, anche le altre simulazioni e consente dunque anche per ipotetici nuovi scenari da modellare in futuro di potersi avvalere dei più agili e semplici modelli bidimensionali per poter ottenere una descrizione di massima delle dinamiche in atto, senza dover subito in prima battuta ricorrere a più complesse volumetrie tridimensionali.

Sottolineata questa prima questione di natura in qualche modo metodologica, può essere utile analizzare ora un aspetto che ha invece direttamente a che fare con i risultati: essi hanno infatti in grande misura confermato tutte le problematiche che si erano evidenziate empiricamente nel corso del tempo e che avevano in qualche modo spinto ad avviare questo progetto di Storia e Aria.

Dai risultati infatti emergono due grossi problemi: un eccessivo surriscaldamento della parte sommitale della sala e un'altra importante criticità legata alle correnti che si generano all'interno della fossa e sul palco.

Si tratta di due fenomeni molto diversi, ma altrettanto sgradevoli e problematici.

Il primo, dovuto alla stratificazione dell'aria calda, fa sì che nelle ultime file di platea e galleria si registrino temperature estremamente superiori a quelle prescritte per avere una situa-

zione di comfort ottimale. Il valore registrato infatti, non è probabilmente quello realmente misurabile in condizioni reali: esiste infatti un'ulteriore bocchetta di ripresa dell'aria in corrispondenza della balconata che in queste simulazioni non è stata presa in considerazione per mancanza di dati tecnici precisi, tuttavia l'alterazione che questa può apportare non risulta tale da modificare i risultati in maniera radicale. L'inserimento di quest'ultima nell'analisi comporterebbe semplicemente un abbassamento della temperatura localizzato in galleria, che attualmente risulta notevolmente elevato.

Il secondo invece è connesso alla presenza di forti correnti in corrispondenza del palco e della fossa degli orchestrali e, in questo ultimo caso esse sono associate a basse temperature che rendono questi ambienti privi delle adeguate condizioni di comfort termico.

In particolare empiricamente si notava che la presenza o meno del pubblico faceva sensibilmente variare le correnti in questa zona, a seconda della condizione di affollamento infatti i teli della scena si muovevano in maniera differente. Questo è stato essenzialmente verificato eseguendo le simulazioni in presenza e assenza di pubblico. Si osserva altresì che all'interno dell'ambiente teatrale si formano vortici d'aria concentrati e piuttosto settorizzati che tuttavia interagiscono tra loro influenzandosi.

Le correnti sembrano infatti associate all'apporto di calore fornito dagli spettatori che innescano forti fenomeni convettivi le cui dirette conseguenze sono le condizioni di scarso benessere termo-igrometrico di chi ci lavora.

Questo primo segmento di analisi ha quindi consentito di rilevare diversi aspetti salienti:

- il fatto che sia utile svolgere parallelamente analisi bi- e tri-dimensionali per riuscire a comprendere se, a seconda del caso in esame, possano essere ugualmente rappresentative, consentendo di poter sfruttare appieno i punti di forza di entrambi gli approcci: la rapidità e relativa semplicità delle prime e la completezza e maggior precisione delle seconde;
- l'evidente utilità di questo tipo di simulazioni per avere dei riscontri il più possibile oggettivi di fenomeni rilevabili empiricamente e soprattutto di poter disporre di output piuttosto semplici da leggere ed illustrare ad un eventuale interlocutore in fase di valutazione preliminare di eventuali interventi da eseguire: si ottengono infatti gradienti di colore piuttosto intuitivi relativi a grandezze come pressione, temperatura e velocità dell'aria;
- in un contesto in cui si parla sempre con maggiore intensità dell'importanza delle condizioni di comfort termico e della salubrità degli ambienti in cui le persone trascorrono le proprie giornate, questi strumenti si possono rivelare alleati particolarmente preziosi per mappare eventuali zone ad elevata criticità e per individuare nel caso aree per un possibile intervento.

In conclusione, tenendo conto del livello di conoscenza e delle tecnologie utilizzate il lavoro può essere considerato più che soddisfacente. I dati raccolti e i risultati delle simulazioni costituiscono così un valido input e una solida base di partenza su cui sviluppare studi di dettaglio futuri al fine di ottimizzare le soluzioni tecniche più adatte alla soluzione del problema.

||Bibliografia e Sitografia

- <https://www.teknoring.com/guide/guide-ingegneria/fluidodinamica-computazionale-cfd-applicazioni-comuni-e-software/>
- <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/545846>
- <https://people.dm.unipi.it/acquistp/daini.pdf>
- <https://Tu J., Yeoh G.H., Liu C., 2008, Computational Fluid Dynamics, a practical approach, Elsevier>
- <https://Date A.W., 2005, Introduction to computational Fluid Dynamics, Cambridge University Press>
- https://moodle2.units.it/pluginfile.php/185767/mod_resource/content/1/Turbolenza.pdf
- <https://amslaurea.unibo.it/9588/>
- El-Hariry G., Khalil E.E., Abdel-Samee W., 2008, Numerical investigations of thermal comfort and indoor air quality inside airconditioned amphitheatre, Indoor Air 2008, 17-22 August 2008, Copenhagen, Denmark
- Hudisteanu V., Popovici C.G., 2015, Comparative Analysis of HVAC system functionality in “Vasile Alecsandri” National Theatre of Jassy
- HJing C.S., 2018, Numerical investigation of indoor environmental quality and ventilation performance in a university lecture theatre
- Kavacic M., Mumovic D., Stevanovic Z., Young A., 2007, Analysis of *thermal* comfort and indoor air quality in a mechanical ventilated theatre, Energy and Buildings 40
- Mateus N., Carrilho Da Graca G., 2014, Thermal and airflow simulation of the Gulbenkian Great Hall, 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28
- MASHRAE Handbook, 2001, HVAC Fundamentals
- Botto M., 1986, Il teatro Carlo Felice di Genova storia e progetti, Sagep Editrice, Genova
- Celant G., 2012, Aldo Rossi. Teatri, Skira, Milano
- Ferlenga A., Rossi A., 2004, Aldo Rossi: l'archivio personale: disegni e progetti delle collezioni del MAXXI Museo nazionale delle arti del XI secolo Roma, Federico Motta, Milano
- Iovino R., 1991, Il Carlo Felice due volti di un teatro, Sagep Editrice, Genova
- Gardella I., Buzzi Ceriani F., 1992, Progetti e architetture 1933-1990, Marsilio, Venezia

- MAXXI, Valente E., Zanchettin V., 2010, I teatri di Carlo Scarpa: archivio e ricerca nelle collezioni del MAXXI Architettura, Electa, Milano
- Schmuckher A., 1987, Storia del teatro Carlo Felice, Compagnia dei Librai, Genova
- Stefanutti L., 2001, Impianti di climatizzazione tipologie applicative 2a edizione, Tecniche Nuove, Milano
- <https://www.carlofelicegenova.it/teatro>
- <https://sbs.uniroma1.it/mostra/architeatro/it/40/piante-e-prospetti-del-teatro-carlo-felice-di-genova>
- <http://www.culturainliguria.it/cultura/download/fstore/1496753008782/Dossierteatristorici.pdf>
- <http://ceraunavoltagenova.blogspot.com/2013/09/piazza-de-ferrari-teatro-carlo-felice.html>
- <https://www.sagicofim.com/>
- <http://www.airnova.it/wp-content/uploads/2014/06/Sistemi-Diffusione-Aria.pdf>